

VARIABILIDAD DE LA FRECUENCIA CARDÍACA: INVESTIGACIÓN Y APLICACIONES PRÁCTICAS PARA EL CONTROL DE LOS PROCESOS ADAPTATIVOS EN EL DEPORTE

Jesús Ortigosa, Rafael E. Reigal, Gabriel Carranque y Antonio Hernández-Mendo

Universidad de Málaga, España

RESUMEN: Esta revisión analiza las principales aplicaciones y limitaciones de los monitores de frecuencia cardíaca en el ámbito deportivo. Los aspectos clave, que tanto investigadores como entrenadores deberían considerar, han sido expuestos con el fin de optimizar su uso en el control diario del entrenamiento mediante la monitorización de la variabilidad de la frecuencia cardíaca. Estos se refieren a la fiabilidad y validez; así como consideraciones metodológicas fundamentales para su registro e interpretación. Teniendo en cuenta sus limitaciones, este trabajo manifiesta la utilidad de los principales indicadores de actividad parasimpática (i.e. rMSSD) donde monitorizados en reposo durante cortos periodos, 3-4 veces por semana, podrían mejorar los procesos de control de adaptación al entrenamiento, tanto fisiológicos como psicológicos, en deportes individuales y colectivos. En conjunto, el análisis muestra que la frecuencia cardíaca en reposo podría ser una herramienta útil para valorar la respuesta del organismo y maximizar el rendimiento deportivo.

PALABRAS CLAVE: Frecuencia cardíaca, sistema nervioso autónomo, rendimiento, monitorización.

HEART RATE VARIABILITY: RESEARCH AND PRACTICAL APPLICATIONS TO CONTROL ADAPTIVE PROCESSES IN SPORT

ABSTRACT: This review examines the main applications and limitations of heart rate monitors in sports. The key issues, that researchers and trainers should consider, have been exposed in order to optimize their use in daily training control through monitoring the heart rate variability. These concern the reliability and validity; and methodological considerations for registration and data statistical interpretation. Given its limitations, this work shows the usefulness of the main indicators of parasympathetic activity (i.e. rMSSD) which monitored at rest for sort periods, 3-4 times week, could improve control processes adaptation to training, both physiological and psychological, in individual and team sports. Overall, the analysis shows that resting heart could be a useful to assess the adaptive response and performance in this context.

KEYWORDS: Heart rate, autonomic nervous system, performance, monitoring.

VARIABILIDADE DA FREQUÊNCIA CARDÍACA: INVESTIGAÇÃO E APLICAÇÕES PRÁTICAS PARA CONTROLE DE PROCESSOS ADAPTATIVOS NO ESPORTE

RESUMO: Esta revisão examina as principais aplicações e limitações de monitores de frequência cardíaca no esporte. Questões-chave que ambos os pesquisadores e formadores deve considerar, foram expostos a fim de otimizar a sua utilização no controle treinamento diário através de monitoramento da variabilidade da frequência cardíaca. Estas dizem respeito a confiabilidade ea validade; e considerações metodológicas fundamentais para o registro e interpretação estatística dos dados. Dadas as suas limitações, este estudo mostra a utilidade dos principais indicadores da atividade parassimpático (i.e. rMSSD), que monitorado por períodos curtos, 3-4 vezes por semana, poderia melhorar a adaptação de processos de controle ao treinamento, tanto fisiológicos e psicológicos, em esportes individuais e coletivos. Da mesma forma, a análise da frequência cardíaca em repouso poderia ser uma ferramenta útil para avaliar a resposta do organismo e reforçar o desempenho no contexto esportivo.

PALAVRAS-CHAVE: Frequência cardíaca, sistema nervoso autônomo, desempenho esportivo, monitoração.

Manuscrito recibido: 22/12/2015
Manuscrito aceptado: 25/04/2016

Dirección de contacto: Jesús M. Ortigosa, Psicología Social, Trabajo Social, Antropología Social y Estudios de Asia Oriental, Universidad de Málaga, España. E-mail: ptjesusortigosa@gmail.com

La frecuencia cardíaca es un importante objeto de estudio para la medicina tradicional, y en concreto, para los fisiólogos deportivos. El registro cuantitativo de la actividad cardíaca no comienza hasta mediados del siglo XVII cuando John Floyer, un médico inglés, crea uno de los primeros dispositivos capaces de medir el pulso y la variación respiratoria (Billman, 2011). No es hasta mediados del siglo XX, con la aparición del galvanómetro de cuerda desarrollado por el fisiólogo alemán William Einthoven, cuando la ciencia comienza a obtener registros

continuos de la actividad bioeléctrica del corazón. Estos registros, denominados electrocardiogramas (ECG), se componen de tres secciones: onda P, complejo QRS y onda T (Figura 1), que representan la despolarización y repolarización de las aurículas y los ventrículos. Estos avances permitieron la definición de las características electrocardiográficas de numerosas enfermedades y procesos cardiovasculares (Billman, 2011).

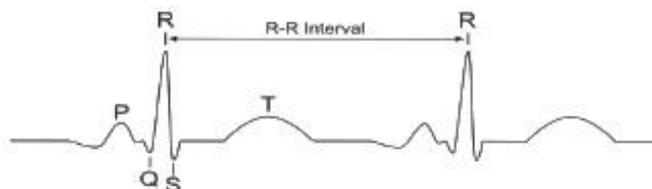


Figura 1. Representación de un intervalo R-R entre complejos QRS.

Desde entonces, el desarrollo tecnológico ha contribuido a una rápida evolución de los instrumentos de monitorización de la frecuencia cardíaca (FC), reduciendo su tamaño y costes. Actualmente se encuentran adaptados en relojes o aplicaciones móviles que han sido validadas respecto a las mediciones del ECG (Flatt y Escó, 2013; Leger y Thivierge, 1988; Quintana, Heathers, y Kemp, 2012). Estos dispositivos añaden una banda flexible y adaptable al torso. La banda forma el elemento emisor con dos electrodos situados a ambos lados del corazón captando las derivaciones de la actividad cardíaca. El reloj y/o aplicación móvil forman el elemento receptor, contando con un procesador que integra las señales eléctricas y el tiempo. Estos sistemas incluso han sido optimizados para registrar la FC en actividades acuáticas (Belloch y Forner, 1999) utilizando como método la oximetría. Este se fundamenta en la relación de absorción de la luz roja e infrarroja con la saturación de oxígeno en sangre, permitiendo la medición indirecta del pulso cardíaco.

El crecimiento en sus funcionalidades como la estimación del volumen máximo de oxígeno (VO₂max), análisis de la carga de entrenamiento, cálculo calórico de la actividad, etc., ha

convertido este instrumento en una herramienta fundamental en el ámbito deportivo y científico. Recientemente, algunos monitores de frecuencia cardíaca (MFCs) han incorporado el registro de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC). Este parámetro ha sido identificado como un posible marcador de la adaptación del organismo a las cargas de entrenamiento (Buchheit, 2014), además de otras aplicaciones que se abordarán en este trabajo.

La variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC)

El registro de la actividad cardíaca se refiere normalmente al número de latidos en un momento preciso o espacio de tiempo previamente determinado. Sin embargo, el tiempo (en milisegundos) entre latidos es variable. Esta variación de latido a latido hace referencia al concepto de VFC. El método tradicional para medir esta variación se basa en el cálculo de la diferencia de tiempo entre cada una de las ondas R, más conocidos como intervalos RR (Billman, 2011). Estas diferencias son producto del control que el sistema nervioso autónomo (SNA) ejerce sobre la innervación y regulación de la FC (Figura 2).

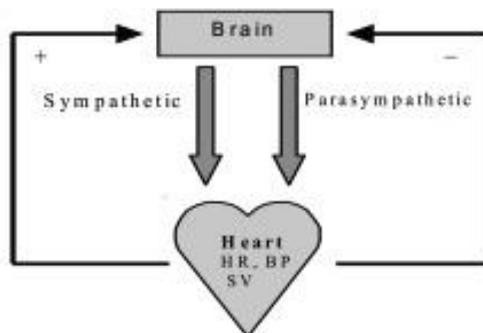


Figura 2. Modelo ilustrativo de la influencia del sistema nervioso simpático y parasimpático sobre la frecuencia cardíaca. Fuente: Aubert, Seps, y Beckers (2003).

El equilibrio existente entre el sistema nervioso simpático (SNS) y parasimpático (SNP) afecta directamente al tiempo que se produce entre latidos. El SNP participa en la regulación del aparato cardiovascular entre otros. Entre sus funciones se encuentra la gestión del reflejo barorreceptor y la liberación de acetilcolina en el nodo sinusal mediada por el nervio vago. La acción de este neurotransmisor produce una disminución en la FC que provoca o mantiene el estado de reposo tras un estímulo estresante (e.g. actividad física, ansiedad, etc.). Por el contrario, el SNS es el encargado de aumentar la FC tras la liberación de adrenalina y noradrenalina en el torrente sanguíneo, con el fin de preparar al organismo ante una situación de estrés físico y/o psicológico.

Uno de los primeros modelos portátiles capaces de registrar este parámetro aparece en 1995 introducido por la empresa Polar Electro Oy (Laukkanen y Virtanen, 1998). Las primeras investigaciones con este dispositivo, Vantage NV™, describieron los períodos de recuperación y sobre-entrenamiento y su relación con la VFC (Kaikkonen, Karppinen, y Laukkanen, 1997). La medición de este parámetro informa de manera indirecta sobre la actividad del SNA que se encuentra asociada a los procesos fisiológicos adaptativos que se producen durante el entrenamiento (Garet et al., 2004a; Kiviniemi et al., 2010).

Aunque algunos estudios han mostrado como la VFC podría estar relacionada con la intensidad del ejercicio (Cottin et al., 2004) o el rendimiento deportivo (Buchheit, Simpson, Al Haddad, Bourdon, y Mendez-Villanueva, 2012; Buchheit et al., 2010; Nummela, Hynynen, Kaikkonen, y Rusko, 2010), la literatura científica aun no es consistente en su utilización e interpretación como herramienta de control del proceso de entrenamiento. Como indican algunos autores (Buchheit, 2014), estas discrepancias podrían deberse a la heterogeneidad en los métodos de evaluación (Task Force, 1996) e inconsistencias metodológicas.

Debido al crecimiento de su uso, la investigación en teoría del entrenamiento y la continua aparición de nuevos dispositivos, este trabajo posee como primer objetivo analizar la validez y fiabilidad de estos instrumentos. En segundo lugar, identificar los índices que interpretados correctamente, podrían ser útiles en la monitorización de cambios significativos durante el proceso de entrenamiento. Por último, el tercer objetivo es exponer las consideraciones metodológicas fundamentales para su análisis e interpretación en el contexto deportivo.

Precisión en la medida

La monitorización de la FC y la VFC permite recolectar datos, que una vez transferidos y posteriormente analizados en el ordenador, son útiles para determinar o evaluar diferentes aspectos relacionados con la intensidad del ejercicio (Kaikkonen, Hynynen, Mann, Rusko, y Nummela, 2010; Seiler, Haugen, y Kuffel, 2007), el estado de sobre-entrenamiento (Hedelin, Wiklund, Bjerle, y Henriksson-Larsén, 2000; Kaikkonen et al., 1997), la planificación deportiva (Buchheit, 2014; Buchheit et al., 2010; Kiviniemi et al., 2010; Kiviniemi, Hautala, Kinnunen, y Tulppo, 2007; Plews, Laursen, Stanley, Kilding, y Buchheit, 2013b; Stanley, Peake, y Buchheit, 2013) o el estado psicológico (César, Blásquez, Rodas, y Ortís, 2009; Sánchez, Romero, y Ortís, 2013). La facilidad de uso y concordancia de los registros con los ofrecidos por un ECG, hace que sea una herramienta excelente

para los entrenadores y fisiólogos deportivos. Sin embargo, la variedad y el número de modelos de MFC en el mercado no corresponde al existente de publicaciones académicas que hagan referencia a la fiabilidad y validez de estos instrumentos respecto a la medida de la FC e intervalos RR. La mayoría incluyen servicios adicionales como sistemas de posicionamiento global (GPS) o altímetros, que sí cuentan con este tipo de investigaciones (Menaspà, Impellizzeri, Haakonssen, Martin, y Abbiss, 2014; Wieters, Kim, y Lee, 2012).

Los monitores pertenecientes a la empresa Polar Electro Oy cuentan con una amplia red de investigaciones para muchos de sus modelos que además son utilizados frecuentemente en estudios de valoración biológica o psicológica. Uno de los principales estudios fue el realizado por Leger y Thivierge (1988) donde compararon la validez, estabilidad y funcionalidad de trece MFCs. Estos fueron divididos en tres categorías acordes a la correlación del registro de datos respecto al ECG de Holter. Esta relación era calificada de excelente si el coeficiente de correlación (r) era igual o mayor a .93; buena si $.65 < r < .93$; e inadecuada si $r < .65$. Basándose en este sistema, los autores concluyeron que los modelos PE 3000 (Polar Electro), Pacer 2000 H (Sportronic AG) y Monark 1 (Monark-Crescent) presentaron una validez adecuada para su uso comparados con el ECG. Los MFCs que obtuvieron una puntuación baja fueron aquellos que registraban los datos a través de electrodos situados en los dedos o manos o determinaban el pulso mediante el método de oximetría en el lóbulo de la oreja.

Posteriormente Seaward, Sleamaker, McAuliffe, y Clapp (1990) presentaron resultados similares de fiabilidad ($r = 0.99$) para el modelo PE 3000 (Polar Electro) tras comparar 250 registros con el sistema ECG en diferentes situaciones de actividad física aeróbica a intensidad variada. Es importante destacar que aunque la mayor parte de las investigaciones han centrado su atención en población sana y deportista (Leger y Thivierge, 1988; Nunan et al., 2009; Quintana et al., 2012), algunos autores han analizado estos factores en población infantil (Gamelin, Baquet, Berthoin, y Bosquet, 2008). Los resultados aún menos precisos que en adultos muestran como, en este caso el modelo Polar S810, es una herramienta válida para el registro y análisis de los intervalos RR en niños. También se observa como los registros en situaciones de estrés psicológico (Goodie, Larkin, y Schauss, 2000) concuerdan ($r = .98$) entre las medidas ECG y los dispositivos.

El contexto de medición (estático o dinámico) es uno de los principales factores a tener en cuenta en estos dispositivos. En referencia a este aspecto, son varios los estudios que han encontrado evidencias consistentes comparando registros en diferentes situaciones. Weippert et al. (2010) comparó la medición de los intervalos RR en tres dispositivos: Polar S810i, Suunto t6 y ECG. Las mediciones se realizaron en 19 individuos (edades comprendidas entre 22 y 31 años) en posición supina, sentados, actividad moderada y actividad progresiva en intensidad. Los resultados muestran como el coeficiente de correlación intraclase (ICC > 0.99) indica una excelente concordancia entre los tres dispositivos, siendo ligeramente superior entre el ECG y el modelo Polar S810i.

El crecimiento de estas investigaciones coincide con el interés de encontrar una evaluación alternativa a los ECGs. Hasta ahora, los estudios analizados comparten una limitación común ligada

al escaso tamaño muestral, siendo necesaria más investigación con un mayor tamaño muestral. Recientemente, Wallén et al. (2012) evaluó la validez del modelo Polar RS800 en una muestra amplia ($n = 341$) teniendo en cuenta variables como la edad o el género. Los resultados del ICC indicaron como se atribuían valores más bajos para el género femenino en todas las variables respecto al masculino. Además, no se alcanzó el coeficiente ICC mínimo para el valor de SDNN en ninguna de las tres categorías femeninas y aún más destacable, en ninguna de las variables para las mujeres mayores de 60 años. Por el contrario, si se obtuvieron altos índices de ICC ($r = .99$) para las variables en el género masculino. Los autores recomiendan, siempre que sea posible, realizar una evaluación tradicional (ECG), aunque también destacan las características de los diseños de los MFC y sus ventajas (Wallén et al., 2012).

Respecto a los sistemas que permiten monitorizar a más de un atleta al mismo tiempo, Schönfelder, Hinterseher, Peter y Spitzenpfel (2011) realizaron la comparación de cuatro de estos dispositivos telemétricos (Polar Team² Pro, Acentas Team, Suunto Pro Team Pack y Activio Sport System) en tres categorías: software, hardware y fiabilidad de la medida. Los resultados muestran que el sistema Acentas es aquel que alcanza una mayor puntuación general, aunque los autores concluyen que cada sistema posee ventajas e inconvenientes dependiendo del propósito de su uso, localización y tiempo atmosférico.

La mayoría de los fabricantes permiten la sincronización de datos con una interfaz web dónde se visualizan instantáneamente. Además, incluyen softwares de corrección digital de la señal para los registros de VFC. No obstante, algunos autores recomiendan la corrección visual dados los posibles errores del sistema (Storck, Ericson, Lindblad, y Jensen-Urstad, 2001). Por otro lado, muchos de los estudios analizados con el fin de validar este instrumento han utilizado una frecuencia de muestreo de 1000 Hz (Gamelin, Berthoin, y Bosquet, 2006; Quintana et al., 2012; Seaward et al., 1990). Esta frecuencia parece la adecuada para realizar este tipo de análisis puesto que parece razonable que un incremento en el número de datos aumente la precisión de la medida al igual que sucede en otro tipo de tecnologías como los GPS (Castellano y Casamichana, 2014).

El coste económico, versatilidad, facilidad de uso, inmediatez y validez parecen las principales ventajas que nos aportan estos dispositivos para su uso diario frente a los métodos tradicionales. Sin embargo, tal y como indican algunos autores (Buchheit, 2014; Quintana et al., 2012; Schäfer et al., 2015), se debe ser cuidadoso en la interpretación de los datos, pudiendo sufrir modificaciones en su estimación para determinados grupos de edad o género.

Principales aplicaciones en el ámbito científico-deportivo

El uso de los MFCs en el ámbito científico y deportivo es variado. Entre las disciplinas que han destacado en su incorporación al entrenamiento diario se encuentran los deportes de resistencia. Hoy en día es extraño encontrar un atleta que no utilice este tipo de tecnología para valorar su efecto de la carga de entrenamiento junto a variables como la percepción subjetiva del esfuerzo (Cañada, Luque, y Sánchez, 2014).

Tradicionalmente se han utilizado indicadores de carga externa (tiempo, velocidad, distancia, etc.) que no reflejaban el

impacto del ejercicio (Wallace, Slattery, y Coutts, 2014). En deportes como ciclismo, triatlón o esquí de fondo, la velocidad de desplazamiento no siempre se corresponde con la intensidad real. Dichos parámetros pueden ser influidos por diversos factores tales como la disposición del terreno o las condiciones ambientales (Achten y Jeukendrup, 2003). Por esta razón, el control de la carga interna del entrenamiento es imprescindible en este tipo de marcos para optimizar el rendimiento. Los cambios en las concentraciones de lactato o los análisis de los perfiles de creatina quinasa (CK) y urea (U) podrían utilizarse para controlar el estado de forma, pero estos métodos son invasivos y no pueden aplicarse frecuentemente (Buchheit, 2014).

El indicador interno por excelencia de la intensidad durante el ejercicio es el consumo máximo de oxígeno (VO_2 máx). Aunque no hay establecido un "gold standard", la relación lineal que la literatura muestra entre la FC y el VO_2 máx (Lubans, Morgan, Callister, y Collins, 2008), además de otros factores como el gasto energético, refuerzan la utilización de los registros cardiovasculares para controlar la carga interna del entrenamiento, adaptándose a las características individuales del atleta de forma no invasiva, rápida y eficaz. Esta relación ha permitido desarrollar diversas ecuaciones que estiman las zonas de entrenamiento a partir de las pruebas de determinación de umbrales, siendo la Frecuencia Cardíaca Máxima (FCM) uno de los valores más utilizados. La determinación del umbral anaeróbico es sin duda una de las mayores aplicaciones prácticas de la monitorización de este parámetro. El test de Conconi (Conconi et al., 1996), con una trayectoria de más de dos décadas, es una de las herramientas de campo más utilizadas para su cálculo en deportes de resistencia.

Recientemente los investigadores han centrado su interés en el estudio del comportamiento de la VFC como herramienta de control del entrenamiento. Algunos autores muestran como la prescripción diaria de tareas en base a la fluctuación de la VFC es más eficiente comparada con los modelos tradicionales (Plews, Laursen, Stanley, Kilding, y Buchheit, 2013b). Estos resultados se basan en observaciones previas que han asociado alteraciones en parámetros relacionados con la actividad parasimpática a diferentes intensidades de esfuerzo (Buchheit, Simon, Piquard, Ehrhart, y Brandenberger, 2004; Cottin et al., 2004; Kaikkonen et al., 2010), procesos de recuperación (Hautala et al., 2001), procesos de adaptación (Manzi et al., 2009; Pichot et al., 2000; Vesterinen et al., 2013), sobre-entrenamiento (Hedelin et al., 2000) y rendimiento (Buchheit et al., 2012; Buchheit et al., 2010; Garet et al., 2004; Nummela et al., 2010).

Por otro lado, discernir entre los factores fisiológicos y psicológicos del rendimiento deportivo no es una tarea sencilla (Córdoba, 2011). La naturaleza de la VFC ha convertido esta variable en un objeto de estudio emergente en el campo de la psicología deportiva. Varios autores han relacionado esta variable con la aparición de rasgos de ansiedad (César et al., 2009; Morales et al., 2013), estados de ánimo (Sánchez et al., 2013) o calidad de sueño (Myllymäki et al., 2011) y destacado la importancia de estos aspectos en competición (Noce y de Moura Simim, 2009). Estos resultados evidencian como este parámetro podría ser una herramienta útil en el control de los procesos adaptativos al entrenamiento (Plews, Laursen, Kilding y Buchheit, 2013a). Pese a esto, algunos autores advierten de la

necesidad de utilizar test psicométricos (e.g. POMS) (Torralba, Ramón, y Lerma, 2009) que complementen los registros de los parámetros relacionados a la frecuencia cardíaca (Buchheit, 2014).

Mientras los registros en deportistas recreacionales o atletas bien entrenados sugieren que la VFC podría ser válida para evaluar las adaptaciones en deportes de resistencia, los datos obtenidos en atletas de élite con un largo historial deportivo no son consistentes (Plews et al., 2013b). En este tipo de población algunos autores han observado como los niveles de actividad parasimpática se reducen durante los períodos de tapering (Hug et al., 2014; Manzi et al., 2009). Este hecho podría ser interpretado como una disminución del rendimiento. Sin embargo, este comportamiento ha sido asociado con buenos resultados en competición (Garet et al., 2004; Plews, Laursen, Kilding, y Buchheit, 2014). Algunos autores lo explican como una posible causa del estrés competitivo (Morales et al., 2013), disminución del volumen plasmático (Mujika et al., 2000) o fenómeno de saturación de los receptores de acetilcolina a nivel intramuscular (Buchheit, 2014). Dado que la literatura no es consistente, se debe ser cauto en la interpretación de esta variable en deportistas de élite.

El control de las variables relacionadas con la FC (e.g. VFC) resulta un área de gran interés para los científicos, entrenadores o atletas dada su posible utilidad en la optimización del proceso de entrenamiento.

Consideraciones metodológicas en el uso diario de la VFC

El desarrollo tecnológico ha permitido la incorporación gradual de la VFC al ámbito deportivo (Gamelin, et al., 2006). Este hecho se debe a que la literatura científica no es consistente en la metodología de aplicación e interpretación de esta variable. En consecuencia, este trabajo expone a continuación las principales incongruencias metodológicas y ofrece evidencias sobre su correcta evaluación e interpretación para su uso diario en el proceso de entrenamiento.

Indicadores de la VFC

El análisis de la VFC es una tarea compleja dado los numerosos índices y métodos de evaluación. Los métodos más comunes son los que se basan en el dominio temporal, en el dominio frecuencial y los no-lineales (Task Force, 1996). Cada uno de los índices representa una manifestación del SNA, es decir, algunos se asocian más probablemente a la actividad del SNP; mientras que otros a la actividad del SNS (Task Force, 1996). La monitorización diaria del entrenamiento requiere índices prácticos y fáciles de calcular. En este texto no se contempla la exposición de todos los parámetros asociados a la VFC, para ello pueden consultarse los trabajos de otros autores (Rodas, Pedret, Ramos, y Capdevila, 2008; Task Force, 1996).

Los principales índices surgen del análisis matemático de los intervalos RR y se sitúan dentro de la categoría de dominio temporal. Estos valores son: la raíz cuadrada del valor medio de la suma de las diferencias al cuadrado de todos los intervalos RR sucesivos (rMSSD) y la desviación estándar de los intervalos RR instantáneos obtenida del plot de Poincaré (SD1); ambos relacionados con la actividad parasimpática. Varios estudios muestran como estos parámetros están relacionados con el rendimiento (Buchheit et al., 2010; Garet et al., 2004), la

distribución de la intensidad (Plews et al., 2014) o las adaptaciones diarias al entrenamiento (Bara-filho et al., 2013; Kiviniemi et al., 2010; Plews, Laursen, Kilding, y Buchheit, 2012).

La preferencia de los autores por estos índices reside en que su registro es compatible con períodos de corta duración (véase punto 3.1.2) facilitando la investigación de campo con atletas. Además, presentan una sensibilidad reducida a la frecuencia respiratoria al contrario que los índices de dominio frecuencial (Billman, 2011) y su cálculo no requiere de softwares específicos, cuya adquisición en ocasiones puede ser costosa (Buchheit, 2014). Por otro lado, las variaciones de estos índices en el día a día son menores cuando se comparan con otro tipo de análisis. En términos estadísticos, el error típico (ET) expresado como coeficiente de variación (CV) es más elevado en los índices de dominio frecuencial (e.g. LF/HF \approx 80%) que en los índices de dominio temporal (e.g. rMSSD \approx 12%), pudiendo comprometer la sensibilidad de la medida (Al Haddad, Laursen, Chollet, Ahmadi, y Buchheit, 2011).

De acuerdo con la línea metodológica propuesta por Buchheit (2014), los índices de dominio temporal como el rMSSD o SD1 son aquellos que podrían ofrecer mejores resultados y ser contrastables en futuras investigaciones. Esto no descarta la monitorización de otros parámetros (e.g. HF o LF) que también han mostrado ser útiles en la monitorización diaria del entrenamiento (Kiviniemi et al., 2007), aunque manteniendo presentes sus limitaciones.

Duración, frecuencia y posición del registro

Tanto los atletas recreacionales como los atletas de élite tienen como objetivo obtener la máxima eficiencia durante los entrenamientos. En este proceso es necesario valorar si los instrumentos y métodos utilizados para el control diario de la adaptación son prácticos y adecuados a las necesidades individuales de los deportistas.

Algunos autores han defendido la monitorización de la VFC durante la noche dado que este período supone el espacio de restauración más importante del organismo y ofrece una estandarización de la medición al ser una condición exenta de estímulos externos. (Buchheit, Simon, Piquard, Ehrhart, y Brandenberger, 2004; Nummela et al., 2010; Pichot et al., 2000). Sin embargo, el sueño no es un estado uniforme. La alternancia de ciclos de sueño lento (NREM), caracterizadas por una predominancia parasimpática, y las fases REM (Rapid Eye Movement) donde se produce una gran activación del SNS, dificulta la estandarización de los datos. De acuerdo con Buchheit et al. (2004), los registros de la VFC nocturna deben centrarse en las fases de sueño lento en cortos períodos de tiempo (e.g. 5 minutos) con el fin de obtener registros en las fases de mayor actividad vagal, y por tanto, consideradas como procesos de recuperación (Horne y Minard, 1985).

En la práctica, el uso de los índices de VFC nocturna es difícil de incorporar en la rutina diaria del atleta. Además, debemos tener en cuenta que la intensidad del ejercicio del día anterior podría alterar los parámetros (Myllymäki et al., 2011), añadiendo otra limitación. Por esta razón, la tendencia actual se dirige hacia los registros de corta duración (5-10 minutos) al despertar (Aubert, Seps, y Beckers, 2003) en posición supina en reposo (Al Haddad et al., 2011).

Este método permite estandarizar la medida al producirse a la misma hora, lugar y posición. Además, permite analizar los datos previamente al entrenamiento, pudiendo ajustar la tarea al resultado. Estas ventajas del registro en estado de reposo al despertar contrastan con las limitaciones de la medida de la VFC durante el ejercicio o post-ejercicio. En estos casos, el análisis siempre es posterior al entrenamiento, imposibilitando variar el entrenamiento el día en función del resultado. Además, la frecuencia se limita al momento en el que el atleta puede realizar el entrenamiento (Stanley et al., 2013), mientras que los registros en reposo al despertar pueden realizarse durante los días de descanso, los cuales posibilitan realizar un seguimiento de los procesos de recuperación. En esta línea, varios autores (Kiviniemi et al., 2007, 2010; Plews et al., 2012, 2013b, 2014) han mostrado como la VFC podría ser una herramienta útil en la monitorización diaria del entrenamiento.

Respecto a la frecuencia del registro, Buchheit (2014) sugiere que los índices de VFC relacionados con la actividad parasimpática (e.g. rMSSD) deben recogerse al menos entre 3-4 veces por semana con el fin de operar con la media semanal. De ese modo, el error de la medida disminuirá al aumentar el número de registros realizados en base al factor: $1/\sqrt{n}$ (Hopkins, 2004). Por tanto, la posibilidad de malinterpretar la VFC y su relación con los procesos adaptativos es menos probable que si se utilizaran los valores diarios, pudiendo estos últimos llevarnos a tomar decisiones equivocadas en la prescripción del ejercicio (Buchheit, Papelier, Laursen, y Ahmaidi, 2007).

La valoración del cambio

La monitorización diaria debe guiar al entrenador en la realización de inferencias sobre las tareas con el fin de trazar las líneas de la planificación deportiva. En ocasiones, la interpretación de los datos recogidos puede no ser la correcta, limitando el desarrollo del atleta. El enfoque tradicional distingue si un cambio es significativo o no en base al valor p (e.g. intervalo de confianza del 95%; $p < .05$). El problema que presenta a nivel práctico es que un efecto no significativo suele interpretarse como nulo o por el contrario, un efecto significativo que puede sea trivial, es normalmente malinterpretado como sustancial (Hopkins, Marshall, Batterham, y Hanin, 2009). Además, la significancia estadística no nos proporciona la información más importante, es decir, la magnitud del efecto.

Para considerar si se ha producido o no un cambio dada una variable este debe en primer lugar definirse. Hopkins (2004) introduce el concepto de "*Smallest Worthwhile Change*" (SWC) que considera el valor mínimo a partir del que un cambio sustancial ha ocurrido. Definir esta magnitud no es sencillo, debiendo adaptarse a las características individuales del atleta y el contexto deportivo (Hautala et al., 2006). Hopkins et al. (2009) propone que en deportes individuales la expresión como fracción de un cambio dada una variable (e.g. rendimiento) sea posiblemente la mejor opción de estandarizar la medida. De esta forma, se considera un tercio sobre la variación de rendimiento (CV) del atleta entre competiciones como el SWC. Estos valores tienen como fundamento los análisis que Hopkins et al. (1999)

realizaron sobre atletas de velocidad, determinando que la mejora de $0.3 \times CV$ en el rendimiento otorgaría al deportista la victoria en una de cada diez carreras. En esta línea, Hopkins et al. (2009) propone que estos valores podrían ser estandarizados en base al cálculo de la d de Cohen como tamaño del efecto (Cohen, 1988) con alguna modificación, considerando cambios pequeños ($> 0.2-0.6$), medianos ($>0.6-1.2$), grandes ($>1.2-2$) o muy grandes (>2). Este procedimiento estadístico permite además el desarrollo de meta-análisis combinando los resultados de varios estudios para dar una mejor estimación global del efecto.

En este punto, parece más adecuado reportar la magnitud del efecto (ME) junto con la estimación de su intervalo de confianza, es decir, la probabilidad que los límites definidos incluyan el valor real (ME). La información que nos proporciona es equivalente al de una prueba de significancia (e.g. usar 1-95% es equivalente a asumir $p < .05$). En términos cualitativos, Hopkins (2007) diseña estos intervalos en la siguiente escala: muy improbable ($< .05\%$), casi sin certeza (.05-5%), muy poco probable (5-25%), poco probable (25-75%), posible (75-95%), probable (95-99.5%) y muy probable ($>99.5\%$). El cálculo de los intervalos de confianza y su posterior interpretación ha sido facilitado para el usuario en una hoja Excel del mismo autor (Hopkins, 2007).

La aplicación de esta metodología estadística (Figura 3) en la monitorización diaria del entrenamiento y el ámbito científico requiere establecer una línea basal con el fin de determinar el CV de la variable e inferir cambios a partir de las consideraciones anteriormente descritas. En el caso concreto de la VFC, los autores (Buchheit, 2014; Plews et al., 2012) coinciden en monitorizar esta variable (e.g. rMSSD) durante la primera semana de entrenamiento y calcular el CV individual de cada atleta. Además, debido al elevado error típico asociados en estos parámetros, incluso en aquellos de dominio de tiempo (Buchheit, 2014), se recomienda transformar los datos en base a su logaritmo natural (e.g. \ln rMSSD). De esta forma es posible distribuir las tareas atendiendo a las necesidades y respuestas individuales de los deportistas (Hautala et al., 2006) con el fin de optimizar el rendimiento dada la concordancia entre la fluctuación de la carga de entrenamiento y los índices de VFC (Plews et al., 2013a, 2013b, 2014).

En esta línea, cuando el atleta completa bloques de carga moderada el comportamiento asociado de la actividad simpático vagal suele traducirse en un aumento de la misma; mientras que cuando se completan entrenamientos de alta intensidad, se observan reducciones en estos (Plews et al., 2013a). En estos casos, el análisis diario permitiría establecer patrones de recuperación individuales según el tipo de carga de entrenamiento. No obstante, es necesario analizar las características individuales de cada atleta. En particular, algunos autores indican como en períodos de puesto a punto en atletas con una amplia trayectoria deportiva las reducciones en los índices parasimpáticos no necesariamente son indicadores de una inadecuada adaptación al entrenamiento, sino todo lo contrario, de una óptima respuesta del organismo (Buchheit, 2014; Hug et al., 2014).

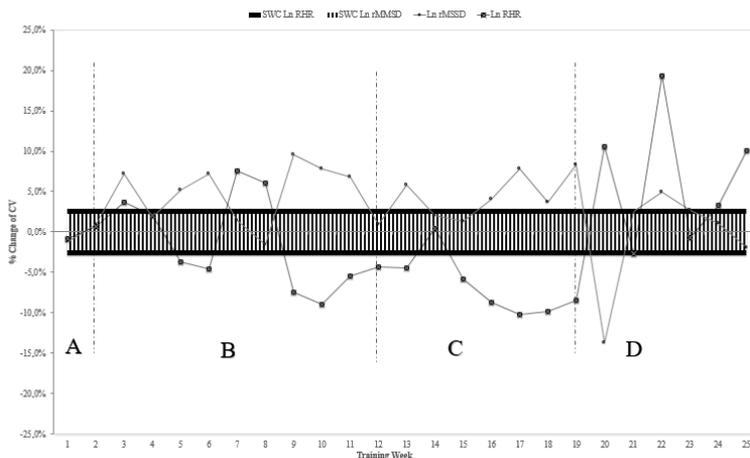


Figura 3. Esta figura muestra la monitorización de la actividad parasimpática durante una temporada completa en un atleta de resistencia. Durante el período A fue establecida la línea basal, mientras que B, C y D corresponden a periodos de preparación (primero, segundo y tercero respectivamente) que incluyen una competición en la última semana de cada uno. Los cambios en el coeficiente de variación (CV) muestran la modulación de los índices cardiovasculares (Ln rMMSD y Ln FCR) en relación a la magnitud mínima de cambio (SWC). Fuente: Ortigosa (2016).

CONCLUSIONES

Este trabajo ha mostrado la fiabilidad y validez de las medidas asociadas a la FC que los MFCs ofrecen en comparación al ECG. También se han expuesto las principales ventajas que estos dispositivos ofrecen, como su reducido tamaño y peso, coste económico y comodidad para su uso diario en el proceso de evaluación individual del entrenamiento. En el caso de los deportes colectivos, gracias a los sistemas telemétricos, es posible el análisis automático de múltiples atletas en tiempo real, permitiendo un feedback inmediato. El análisis del perfil psicofisiológico, la determinación de las zonas de entrenamiento o la detección de procesos de estrés-recuperación son algunas de las opciones que estos instrumentos nos permiten desarrollar.

Por otro lado, los datos revisados en este texto sugieren que la incorporación de la VFC en el control diario del entrenamiento podría ser una herramienta útil para su optimización. Con este fin, el registro de parámetro rMSSD de dominio temporal parece representar según la literatura la fluctuación de la actividad parasimpática, que registrada en un período de corta duración (e.g. 5 minutos) en reposo al despertar con una frecuencia de 3-4 veces por semana, podría ser el método más adecuado para su evaluación. El establecimiento de una línea basal y la consideración de la fase de entrenamiento, edad, género, el error típico individual en la medida y el "Smallest Worthwhile Change", son factores esenciales para la correcta adaptación individual e interpretación de los datos como muestran las evidencias.

La combinación de esta variable con otro tipo de métodos de evaluación no invasivos (e.g. test psicométricos), podría ser la metodología que ofreciera una información completa para configurar las tareas de entrenamiento de forma eficaz y obtener el máximo rendimiento.

REFERENCIAS

- Achten, J., y Jeukendrup, A. E. (2003). Heart rate monitoring: applications and limitations. *Sports Medicine*, 33(7), 517-538.
- Al Haddad, H., Laursen, P. B., Chollet, D., Ahmaidi, S., y Buchheit, M. (2011). Reliability of resting and postexercise heart rate measures. *International Journal of Sports Medicine*, 32(8), 598-605. doi:10.1055/s-0031-1275356
- Aubert, A. E., Seps, B., y Beckers, F. (2003). Heart rate variability in athletes. *Sports Medicine*, 33(12), 889-919. doi:10.2165/00007256-200333120-00003
- Bara, M. G., Freitas, D. S., Moreira, D., Matta, M. D. O., Lima, J. R. P. De, y Nakamura, F. Y. (2013). Heart rate variability and soccer training: a case study. *Motriz*, 19(1), 171-177. doi:10.1590/S1980-65742013000100017
- Belloch, S. L. y Forner, A. (1999). Frecuencia cardíaca en tiempo real y por telemetría para aplicaciones acuáticas. *Apuntes: Educación Física y Deportes*, 55, 10-13.
- Billman, G. E. (2011). Heart rate variability - A historical perspective. *Frontiers in Physiology*, 2, 1-13. doi:10.3389/fphys.2011.00086
- Buchheit, M. (2014). Monitoring training status with HR measures: do all roads lead to Rome? *Frontiers in Physiology*, 5, 17-19. doi:10.3389/fphys.2014.00073
- Buchheit, M., Chivot, A., Parouty, J., Mercier, D., Al Haddad, H., Laursen, P. B., y Ahmaidi, S. (2010). Monitoring endurance running performance using cardiac parasymphathetic function. *European Journal of Applied Physiology*, 108(6), 1153-1167. doi:10.1007/s00421-009-1317-x
- Buchheit, M., Papelier, Y., Laursen, P. B., y Ahmaidi, S. (2007). Noninvasive assessment of cardiac parasymphathetic function: postexercise heart rate recovery or heart rate variability? *AJP: Heart and Circulatory Physiology*, 293(1), 8-10. doi:10.1152/ajpheart.01339.2006.

- Buchheit, M., Simon, C., Piquard, F., Ehrhart, J., y Brandenberger, G. (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), 2813-2818. doi:10.1152/ajpheart.00490.2004
- Buchheit, M., Simpson, M. B., Al Haddad, H., Bourdon, P. C., y Mendez-Villanueva, A. (2012). Monitoring changes in physical performance with heart rate measures in young soccer players. *European Journal of Applied Physiology*, 112(2), 711-723. doi:10.1007/s00421-011-2014-0
- Cañada, F. C., Luque, G. T., y Sánchez, A. L. (2014). La percepción subjetiva de esfuerzo como herramienta válida para la monitorización de la intensidad del esfuerzo en competición de jóvenes futbolistas. *Cuadernos de Psicología del Deporte*, 14(1), 75-82.
- Castellano, J., y Casamichana, D. (2014). Deporte con dispositivos de posicionamiento global (GPS): aplicaciones y limitaciones. *Revista de Psicología del Deporte*, 23(2), 355-364.
- César, J., Blásquez, C., Rodas, G., y Ortís, L. C. (2009). Perfil psicofisiológico de rendimiento en nadadores basado en la variabilidad de la frecuencia cardíaca y en estados de ansiedad precompetitiva. *Revista de Psicología del Deporte*, 18, 37-52.
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*.
- Conconi, F., Grazi, G., Casoni, I., Guglielmini, C., Borsetto, C., Ballarin, E., ... Manfredini, F. (1996). The Conconi test: methodology after 12 years of application. *International Journal of Sports Medicine*, 17(7), 509-519. doi:10.1055/s-2007-972887
- Córdoba, E. P. (2011). Fisiología y psicología en el deporte: Aspectos conceptuales y metodológicos. *Cuadernos de Psicología del Deporte*, 11, 81-88.
- Cottin, F., Médigue, C., Leprêtre, P. M., Papelier, Y., Koralsztein, J. P. y Billat, V. (2004). Heart Rate Variability during Exercise Performed below and above Ventilatory Threshold. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36(4), 594-600. doi:10.1249/01.MSS.0000121982.14718.2A
- Flatt, A. A. y Esco, M. R. (2013). Validity of the athleteTM Smart Phone Application for Determining Ultra-Short-Term Heart Rate Variability. *Journal of Human Kinetics*, 39(1), 85-92. doi:10.2478/hukin-2013-0071
- Gamelin, F. X., Baquet, G., Berthoin, S. y Bosquet, L. (2008). Validity of the polar S810 to measure R-R intervals in children. *International Journal of Sports Medicine*, 29(2), 134-138. doi:10.1055/s-2007-964995
- Gamelin, F. X., Berthoin, S., y Bosquet, L. (2006). Validity of the Polar S810 Heart Rate Monitor to Measure R-R Intervals at Rest. *Medicine y Science in Sports y Exercise*, 38(5), 887-893. doi:10.1249/01.mss.0000218135.79476.9c
- Garet, M., Tournaire, N., Roche, F., Laurent, R., Lacour, J. R., Barthélémy, J. C. y Pichot, V. (2004). Individual Interdependence between Nocturnal ANS Activity and Performance in Swimmers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 24(2), 2112-2118. doi:10.1249/01.MSS.0000147588.28955.48
- Goodie, J. L., Larkin, K. T. y Schauss, S. (2000). Validation of the Polar Heart Rate Monitor for Assessing Heart Rate During Physical and Mental Stress. *Journal of Psychophysiology*, 14(3), 159-164.
- Hautala, A. J., Kiviniemi, A. M., Mäkikallio, T. H., Kinnunen, H., Nissilä, S., Huikuri, H. V., y Tulppo, M. P. (2006). Individual differences in the responses to endurance and resistance training. *European Journal of Applied Physiology*, 96(5), 535-542. doi:10.1007/s00421-005-0116-2
- Hautala, A., Tulppo, M. P., Mäkikallio, T. H., Laukkanen, R., Nissilä, S., y Huikuri, H. V. (2001). Changes in cardiac autonomic regulation after prolonged maximal exercise. *Clinical Physiology*, 21(2), 238-245. doi:10.1046/j.1365-2281.2001.00309.x
- Hedelin, R., Wiklund, U., Bjerle, P., y Henriksson-Larsén, K. (2000). Cardiac autonomic imbalance in an overtrained athlete. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32, 1531-1533.
- Hopkins, W. G. (2004). How interpret changes in an athletic performance test. *Sports Science*, 8, 1-7.
- Hopkins, W. G. (2007). A Spreadsheet for Deriving a Confidence Interval, *Mechanistic. Sports Science*, 11, 16-20.
- Hopkins, W. G., Marshall, S. W., Batterham, A. M., y Hanin, J. (2009). Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 41(1), 3-12. doi:10.1249/MSS.0b013e31818cb278
- Horne, J. A., y Minard, A. (1985). Sleep and sleepiness following a behaviourally "active" day. *Ergonomics*, 28(3), 567-575. doi:10.1080/00140138508963171
- Hug, B., Heyer, L., Naef, N., Buchheit, M., Wehrin, J. P., y Millet, G. P. (2014). Tapering for marathon and cardiac autonomic function. *International Journal of Sports Medicine*, 35(8), 676-683. doi:10.1055/s-0033-1361184
- Kaikkonen, H., Karppinen, T., y Laukkanen, R. (1997, August). Recovery and overtraining detection in male orienteers before, during and after intensive training period. Abstract in 6th International Scientific Symposium on Orienteering, Oslo, Norway.
- Kaikkonen, P., Hynynen, E., Mann, T., Rusko, H., y Nummela, A. (2010). Can HRV be used to evaluate training load in constant load exercises? *European Journal of Applied Physiology*, 108(3), 435-442. doi:10.1007/s00421-009-1240-1
- Kiviniemi, A. M., Hautala, A. J., Kinnunen, H., Nissilä, J., Virtanen, P., Karjalainen, J., y Tulppo, M. P. (2010). Daily exercise prescription on the basis of hr variability among men and women. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(7), 1355-1363. doi:10.1249/MSS.0b013e3181cd5f39
- Kiviniemi, A. M., Hautala, A. J., Kinnunen, H., y Tulppo, M. P. (2007). Endurance training guided individually by daily heart rate variability measurements. *European Journal of Applied Physiology*, 101(6), 743-751. doi:10.1007/s00421-007-0552-2
- Laukkanen, R. M. T., y Virtanen, P. K. (1998). Heart rate monitors: State of the art. *Journal of Sports Sciences*, 16, 3-7. doi:10.1080/026404198366920
- Leger, L., y Thivierge, M. (1988). Heart rate monitors: validity, stability, and functionality. / Moniteurs de fréquence cardiaque: validité stabilite et fonctionnalité. *Physician y Sportsmedicine*, 16(5), 143-146,148-149,151.
- Lubans, D. R., Morgan, P. J., Callister, R., y Collins, C. E. (2008). The relationship between pedometer step counts and estimated VO2Max as determined by a submaximal fitness test in adolescents. *Pediatric Exercise Science*, 20(3), 273-84.

- Manzi, V., Castagna, C., Padua, E., Lombardo, M., D'Ottavio, S., Massaro, M., ... Iellamo, F. (2009). Dose-response relationship of autonomic nervous system responses to individualized training impulse in marathon runners. *American Journal of Physiology. Heart and Circulatory Physiology*, 296(6), 1733-1740. doi:10.1152/ajpheart.00054.2009
- Menaspà, P., Impellizzeri, F. M., Haakonssen, E. C., Martin, D. T., y Abbiss, C. R. (2014). Consistency of Commercial Devices for Measuring Elevation Gain. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(5), 884-886.
- Morales, J., García, V., García-Massó, X., Salvá, P., Escobar, R., y Buscà, B. (2013). The use of heart rate variability in assessing precompetitive stress in high-standard judo athletes. *International Journal of Sports Medicine*, 34(2), 144-151. doi:10.1055/s-0032-1323719
- Mujika, I., Goya, A., Padilla, S., Grijalba, A., Gorostiaga, E., y Ibañez, J. (2000). Physiological responses to a 6-d taper in middle-distance runners: influence of training intensity and volume. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32, 511-517.
- Myllymäki, T., Kyröläinen, H., Savolainen, K., Hokka, L., Jakonen, R., Juuti, T., ... Rusko, H. (2011). Effects of vigorous late-night exercise on sleep quality and cardiac autonomic activity. *Journal of Sleep Research*, 20, 146-153. doi:10.1111/j.1365-2869.2010.00874.x
- Noce, F., y de Moura Simim, M. A. (2009). Análise dos fatores estressantes que interferem no rendimento do atleta de natação no período pré-competitivo. *Revista Iberoamericana de Psicología del Ejercicio y el Deporte*, 4(1), 45-58.
- Nummela, A., Hynynen, E., Kaikkonen, P., y Rusko, H. (2010). Endurance performance and nocturnal HRV indices. *International Journal of Sports Medicine*, 31(3), 154-159. doi:10.1055/s-0029-1243221
- Nunan, D., Donovan, G., Jakovljevic, D.G., Hodges, L.D., Sandercock, G.R.H. y Brodie, D.A. (2009). Validity and Reliability of Short-Term Heart-Rate Variability from the Polar S810. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 41(1), 243-250.
- Ortigosa, J. M. (2017). Factores psicológicos y fisiológicos asociados al rendimiento deportivo. Aplicaciones para su control y mejora en disciplinas de resistencia. (Tesis no publicada). Universidad de Málaga, España y Universidad de Lisboa, Portugal.
- Pichot, V., Roche, F., Gaspoz, J. M., Enjolras, F., Antoniadis, A., Minini, P., ... Barthélémy, J. C. (2000). Relation between heart rate variability and training load in middle-distance runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(10), 1729-1736. doi:10.1097/00005768-200010000-00011
- Plews, D. J., Laursen, P. B., Kilding, A. E., y Buchheit, M. (2012). Heart rate variability in elite triathletes, is variation in variability the key to effective training A case comparison. *European Journal of Applied Physiology*, 112(11), 3729-3741. doi:10.1007/s00421-012-2354-4
- Plews, D. J., Laursen, P. B., Kilding, A. E., y Buchheit, M. (2013a). Evaluating training adaptation with heart-rate measures: A methodological comparison. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 8(6), 688-691.
- Plews, D. J., Laursen, P. B., Kilding, A. E., y Buchheit, M. (2014). Heart-Rate Variability and Training-Intensity Distribution in Elite Rowers. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(6), 1026-1032. doi:10.1123/ijsp.2013-0497
- Plews, D. J., Laursen, P. B., Stanley, J., Kilding, A. E., y Buchheit, M. (2013b). Training adaptation and heart rate variability in elite endurance athletes: Opening the door to effective monitoring. *Sports Medicine*, 43(9), 773-781. doi:10.1007/s40279-013-0071-8
- Quintana, D. S., Heathers, J. A. J., y Kemp, A. H. (2012). On the validity of using the Polar RS800 heart rate monitor for heart rate variability research. *European Journal of Applied Physiology*, 112(12), 4179-4180. doi:10.1007/s00421-012-2453-2
- Rodas, G., Pedret, C., Ramos, J., y Capdevila, L. (2008). Variabilidad de la frecuencia cardíaca: Concepto, medidas y relación con aspectos clínicos (parte II). *Archivos de Medicina del Deporte*, 25(124), 119-127.
- Sánchez, J. M., Romero, E. P., y Ortís, L. C. (2013). Variabilidad de la frecuencia cardíaca y perfiles psicofisiológicos en deportes de equipo de alto rendimiento. *Revista de Psicología del Deporte*, 22(2), 345-352.
- Schäfer, D., Gjerdalen, G. F., Solberg, E. E., Khokhlova, M., Badtieva, V., Herzig, D., ... Wilhelm, M. (2015). Sex differences in heart rate variability: a longitudinal study in international elite cross-country skiers. *European Journal of Applied Physiology*, 115, 2107-2114. doi:10.1007/s00421-015-3190-0
- Schönfelder, M., Hinterseher, G., Peter, P., y Spitzenpfel, P. (2011). Scientific Comparison of Different Online Heart Rate Monitoring Systems. *International Journal of Telemedicine and Applications*, 11, 1-6. doi.org/10.1155/2011/631848
- Seaward, B. L., Sleamaker, R. H., McAuliffe, T., y Clapp, J. F. (1990). The precision and accuracy of a portable heart rate monitor. *Biomedical Instrumentation y Technology / Association for the Advancement of Medical Instrumentation*, 24(1), 37-41.
- Seiler, S., Haugen, O., y Kuffel, E. (2007). Autonomic recovery after exercise in trained athletes: Intensity and duration effects. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(8), 1366-1373. doi:10.1249/mss.0b013e318060f17d
- Stanley, J., Peake, J. M., y Buchheit, M. (2013). Cardiac parasympathetic reactivation following exercise: Implications for training prescription. *Sports Medicine*, 43(12), 1259-1277. doi:10.1007/s40279-013-0083-4
- Storck, N., Ericson, M., Lindblad, L., y Jensen-Urstad, M. (2001). Automatic computerized analysis of heart rate variability with digital filtering of ectopic beats. *Clinical Physiology*, 21(1), 15-24.
- Task Force. (1996). Guidelines Heart rate variability. *European Heart Journal*, 17, 354-381. doi:10.1161/01.CIR.93.5.1043
- Torralla, E. B., Ramón, M. M., y Lerma, F. S. I. (2009). La subescala confusión del POMS como indicador del impacto de la carga de entrenamiento en corredores de fondo y mediofondo. *Revista Iberoamericana de Psicología del Ejercicio y el Deporte*, 4(2), 289-304.
- Vesterinen, V., Häkkinen, K., Hynynen, E., Mikkola, J., Hokka, L., y Nummela, A. (2013). Heart rate variability in prediction of individual adaptation to endurance training in recreational endurance runners. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 23(2), 171-180. doi:10.1111/j.1600-0838.2011.01365.x

- Wallace, L. K., Slattery, K. M., y Coutts, A. J. (2014). A comparison of methods for quantifying training load: relationships between modelled and actual training responses. *European Journal of Applied Physiology*, 114(1), 11-20. doi:10.1007/s00421-013-2745-1
- Wallén, M. B., Hasson, D., Theorell, T., Canlon, B., Osika, W., y Ward, S. A. (2012). Possibilities and limitations of the polar RS800 in measuring heart rate variability at rest. *European Journal of Applied Physiology*, 112(3), 1153-1165. doi:10.1007/s00421-011-2079-9
- Weippert, M., Kumar, M., Kreuzfeld, S., Arndt, D., Rieger, A., y Stoll, R. (2010) Comparison of three mobile devices for measuring R-R intervals and heart rate variability: Polar S810i, Suunto t6 and an ambulatory ECG system. *European Journal of Applied Physiology*, 109, 779-786. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1415-9>
- Wieters, K. M., Kim J. H., y Lee, C. (2012). Assessment of Wearable Global Positioning System Units for Physical Activity Research. *Journal of Physical Activity and Health*, 9(7), 913-923.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Secretaría de Investigación, Desarrollo e Innovación del Ministerio de Economía DEP2012-32124.