



UNIVERSITAS
Miguel Hernández

**USO DE LA VARIABILIDAD DE LA FRECUENCIA CARDIACA
EN LA DIRECCIÓN DEL PROCESO DE ENTRENAMIENTO.
FUNDAMENTACIÓN DE LOS CRITERIOS DE RENDIMIENTO EN LA TOMA DE DECISIONES.**

Grado en Ciencias de la Actividad Física y del Deporte

Alumno: Alejandro Carrillo de León

Tutor: Dr Manuel Moya Ramón

Curso académico: 2018 -2019

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
2. MÉTODO.....	5
3. RESULTADOS	7
4. DISCUSIÓN.....	9
5. CONCLUSIÓN	11
6. PROPUESTA DE INTERVENCIÓN.....	11
7. BIBLIOGRAFÍA.....	14



1. INTRODUCCIÓN

La "variabilidad de la frecuencia cardíaca", se ha convertido en el término comúnmente aceptado para describir las variaciones de la frecuencia del latido cardíaco, durante un intervalo de tiempo previamente definido, a través de un análisis de periodos circadianos consecutivos. Históricamente se ha medido esta variabilidad a partir de un electrocardiograma (ECG), donde se registran cada una de las ondas R pertenecientes al complejo QRS y se calcula el tiempo transcurrido entre las diferentes ondas R consecutivas o intervalo R-R. La diferencia de estas series de intervalos temporales R-R medidas en milisegundos, es lo que llamamos variabilidad de la frecuencia cardíaca o HRV por sus siglas en inglés (*Heart Rate Variability*) (Rodas, Pedret & Capdevila, 2008).

La HRV es una variable que en los últimos años ha crecido en popularidad su seguimiento diario, ya que sus cambios dependen en gran medida del *control del sistema nervioso autónomo sobre el corazón*, que se ve afectado por el carácter y la magnitud del ejercicio físico y el consecuente estado de fatiga, con lo que es útil para comprobar el estado adaptativo del sujeto (Buchheit, 2014). El SNA se subdivide a su vez en dos ramas; la rama simpática (SNS) y la rama parasimpática (SNP). En un estado de reposo hay un predominio de la estimulación vagal, es decir, del SNP, mientras que en estados de estrés, ansiedad y ejercicio físico la predominancia es del SNS (Rodas et al. 2008). Por tanto, la HRV es una variable práctica y no invasiva para monitorizar el balance del sistema nervioso autónomo (SNA), tanto en población sana como en población afectada por diferentes patologías (Task Force of The European Society of Cardiology and The North American Electrophysiology Society of Pacing and Electrophysiology, 1996).

El estudio de la HRV se suele realizar utilizando diferentes métodos de medidas; según el análisis del dominio del tiempo y según el análisis del dominio de la frecuencia (Task Force, 1996). El análisis del dominio-tiempo se basa en el estudio estadístico de los valores promedio o centrales, de entre las que destaca la diferencia temporal (en milisegundos) que hay entre intervalos R-R y a partir de la cual se obtiene el rMSSD (raíz cuadrada de la media de la suma de las diferencias al cuadrado de todos los intervalos R-R sucesivos), siendo éste un índice de HRV adecuado para aplicarlo en el campo práctico por verse menos influenciado por la frecuencia respiratoria (Buchheit, 2014; Plews, Laursen, Kilding & Buchheit, 2013; Saboul, Pialoux & Hautier, 2013), porque bastan registros muy cortos de tiempo (Esco & Flatt, 2014) y porque es un indicador del control cardíaco vagal (tono parasimpático) (Buchheit, 2014).

Existen diferentes metodologías de registro de la HRV en el dominio temporal, siendo, la usada tradicionalmente y considerada Gold Standard, la toma de 10 minutos divididos en un periodo de estabilización que dura 5 minutos seguido de un período de otros 5 minutos donde se registra la HRV para recolectar un periodo apropiado de intervalos R-R, con el fin de realizar un posterior análisis estadístico (Flatt & Esco, 2016).

Se han desarrollado numerosos protocolos de obtención de datos de la HRV para supervisar y realizar un seguimiento a los atletas, registrando la variabilidad de la frecuencia cardíaca durante la noche (Pichot et al., 2000), recién despierto por la mañana (Plews et al., 2013) en posición supina y posteriormente sentado (Schmitt et al., 2013) o sentado (Plews et al., 2017) con tiempos de registro que varían de 1 minuto a 15 minutos (Pichot et al., 2000; Plews et al., 2014; Schmitt et al., 2013; Plews et al., 2017).

Para abordar la problemática de llevar a cabo registros muy largos de tiempo, con la poca aceptación por parte de los atletas que ellos suponen, en la actualidad existen nuevas APPS y herramientas que permiten llevarlo al campo práctico, facilitando su registro sin necesidad de recurrir a material sanitario sofisticado y con la misma validez (Plews & Scott et al., 2017). Este

hecho ha facilitado la realización de registros ultracortos de 1' mediante un smartphone haciendo uso de la técnica de fotopletismografía (PPG) en la cual se utiliza un haz de luz para determinar tanto FC como HRV, con la comodidad que supone para el sujeto (Plews et al., 2012; Plews et al., 2017).

El entrenamiento intenso cambia el equilibrio autonómico cardiaco haciendo que haya un predominio del Sistema Nervioso Simpático (SNS) sobre el Sistema Nervioso Parasimpático (SNP) y gracias al uso de la HRV como medio de monitorización del balance simpático-vagal ha surgido un nuevo modelo de periodización basado en la HRV diaria, llamado Day-To-Day, que permite prescribir y ajustar las cargas de entrenamiento (volumen o intensidad), en función del estado del SNA y por tanto de la recuperación individual del deportista (Kiviniemi, Hautala, Kinnunen & Tulppo, 2007; Vesterinen et al., 2016; Javaloyes, Sarabia, Lamberts & Moya-Ramon, 2019).

Para llevar a cabo un modelo de entrenamiento Day-To-Day el deportista se toma la HRV al despertar y ello permite al entrenador prescribir el entrenamiento de ese día en función de la disponibilidad del organismo para realizarlo (Javaloyes et al., 2019). Autores como Plews et al. (2013) creyeron que no era adecuado establecer una línea basal para prescribir el entrenamiento diario, sino que era más correcto establecer un rango de valores normales de la HRV donde se representara la media y se delimitara tanto por la parte superior como por la parte inferior, sumando y restando respectivamente a la línea basal la mitad (0.5) de una desviación estándar (SD). Con este rango, llamado "Smallest Worthwhile Change" (SWC), se pretende acotar el proceso de variación diaria y solo hacer caso a los cambios relevantes que se salgan de esa zona, tanto por arriba como por abajo, y que, por tanto, suponen un cambio significativo en el proceso adaptativo del deportista (Plews et al., 2013).

La toma de decisiones se ha hecho hasta el día de hoy a partir de algoritmos diseñados por diferentes autores (Kiviniemi et al., 2007; Vesterinen et al., 2016; Plews et al., 2013) consistentes la mayoría de ellos en establecer una línea basal y prescribir entrenamiento en función de la respuesta de la HRV por la mañana y poder modificar la sesión de ese día. Uno de los algoritmos más replicados es el propuesto por Kiviniemi et al. (2007) donde si la respuesta diaria del SNA estaba fuera del SWC se prescribía un entrenamiento de baja intensidad con el fin de no saturar al organismo. Por otra parte, si la respuesta diaria del SNA estaba por encima del SWC se prescribía un entrenamiento de alta intensidad ya que supuestamente el organismo estaba preparado para tolerarlo.

Debido a los diferentes tipos de mediciones algunos autores recomendaron usar promedios en lugar de valores individuales (Plews et al., 2014). La media móvil de la HRV de los últimos 7 días se ha visto que es mejor que solo coger el dato diario, ya que la HRV diaria presenta una gran variación (Plews et al., 2013) por ello esta media móvil ha sido usada en trabajos recientes (Vesterinen et al., 2016; Javaloyes et al., 2019). Sin embargo, otros autores (Nuuttila, Nikander, Polomoshnov, Laukkanen & Häkkinen, 2017) usaron la media móvil de 3 días porque afirmaron que, si bien periodos largos para obtener promedios disminuyen el riesgo de resultados falsos debido a la variación diaria de la HRV (Plews et al., 2014), el hecho de que esos promedios sea tan largos puede dificultar la reacción rápida a los cambios del SNA, proponiendo que una media móvil de 3 o 4 días puede ser fiable, porque es el suficiente tiempo como para disminuir el valor individual diario y a su vez reaccionar rápidamente ante las tendencias observadas (Nuuttila et al., 2017).

La medida basal es la que sirve de referencia para tomar decisiones sobre el entrenamiento diario. Algunos autores usan el SWC del rMSSD (Vesterinen et al., 2016), otros usan el SWC, pero del logaritmo natural (Ln) de rMSSD (Javaloyes et al., 2019), tomando el límite superior e inferior de la mitad (0.5) de la SD de la media móvil propuesto por Plews et al., (2012). Cuando la media móvil de 7 días del LnRMSSD se sale del SWC por debajo, se pasa de un

entrenamiento moderado o intenso a un entrenamiento suave o descanso (Javaloyes et al., 2019)

Autores como Vesterinen et al., (2016) manifiestan limitaciones en lo relacionado con la magnitud del SWC, ya que se usa la mitad (0.5) de la SD en base al trabajo de Plews et al., (2012) cuando el SWC debería ser individualizado atendiendo a las circunstancias de cada sujeto y su respuesta ante el ejercicio.

Por otra parte, existe un parámetro que ha cobrado gran importancia en los últimos meses (Saboul & Hautier, 2019; Flatt & Howells, 2019; Flatt & Esco, 2015), el coeficiente de variación (CV) que es una medida de la dispersión relativa de un conjunto de datos (se obtiene dividiendo la SD del conjunto entre su media aritmética). Por tanto, es la cantidad de variabilidad que hay en los resultados obtenidos diariamente. El CV, combinado con las fluctuaciones de la línea basal con respecto a los valores normales, nos puede proporcionar más información sobre cómo se adapta el SNA al entrenamiento y a otros factores estresantes. Un CV reducido suele asociarse con sobrellevar bien el entrenamiento cuando la HRV se mantiene estable o con una tendencia ascendente (Flatt & Howells, 2019). Contrariamente, reducciones en la HRV junto a mayores fluctuaciones de la misma (CV) son signos de una mala adaptación al entrenamiento, lo que debería provocar cambios en la dirección del proceso del entrenamiento (Flatt, Esco, Nakamura & Plews, 2017).

El objetivo de este trabajo es doble. Por un lado, conocer cuáles son los métodos más utilizados en la bibliografía para el cálculo del SWC, de forma que podamos elegir aquel que aporta una mayor individualización en la dirección del entrenamiento. Por otro lado, revisar los algoritmos o esquemas de tomas de decisión en los entrenamientos day-to-day más empleados, aplicando el mejor método de cálculo del SWC e intentando utilizar aquellos que permitan afinar los niveles de adaptación del deportista.

2. MÉTODO

2.1 Fuentes de búsqueda

Se realizó una búsqueda bibliográfica el día 18 de junio de 2019 en la base de datos PubMed, delimitando la misma con trabajos publicados desde 1996, por ser el año donde se publican las directrices y hasta el mismo día de la búsqueda, es decir, hasta el 18/06/2019 ya que es una temática de actualidad.

A lo largo del trabajo se irá justificando la información redactada y referenciando la fuente de información con el fin de ser lo más objetivo y riguroso posible.

2.2 Claves de búsqueda

La búsqueda se realizó incluyendo título, resumen y palabras clave. En PubMed las palabras claves elegidas fueron las siguientes:

("athlete" OR "cyclist" OR "runner" OR "swimmers" OR "cycling" OR "running" OR "endurance" OR "training" OR "triathlon" OR "individual sport") AND ("HRV" OR "heart rate variability" OR "autonomic function" OR "autonomic nervous system") AND "algorithm" OR "SWC" OR "Smallest Worthwhile Change" OR "formulation" Haciendo un truncamiento de las palabras "athlete" y "runner" ya que son términos que pueden tener varias terminaciones y el objetivo de este trabajo es no dejarse ningún estudio de la literatura sin revisar.

((athlete*[Title/Abstract] OR cyclist[Title/Abstract] OR runner*[Title/Abstract] OR cycling[Title/Abstract] OR running[Title/Abstract] OR endurance[Title/Abstract] OR training[Title/Abstract] OR triathlon[Title/Abstract] OR "individual sport"[Title/Abstract])) AND ("HRV"[Title/Abstract] OR "heart rate variability"[Title/Abstract] OR "autonomic function"[Title/Abstract] OR "autonomic nervous system"[Title/Abstract])) AND (algorithm OR "SWC" OR "smallest worthwhile change" OR formulation)

2.3 Criterios de inclusión

Los métodos de análisis y criterios de inclusión fueron artículos realizados en el ámbito deportivo o del entrenamiento, ya que históricamente la HRV ha sido un tema de interés en el ámbito clínico, motivo por el cual hay numerosos trabajos publicados relacionado con patologías cardíacas. Además, para ser incluidos deberían haberse realizado sobre seres humanos, personas vivas y deportistas.

2.4 Proceso de selección

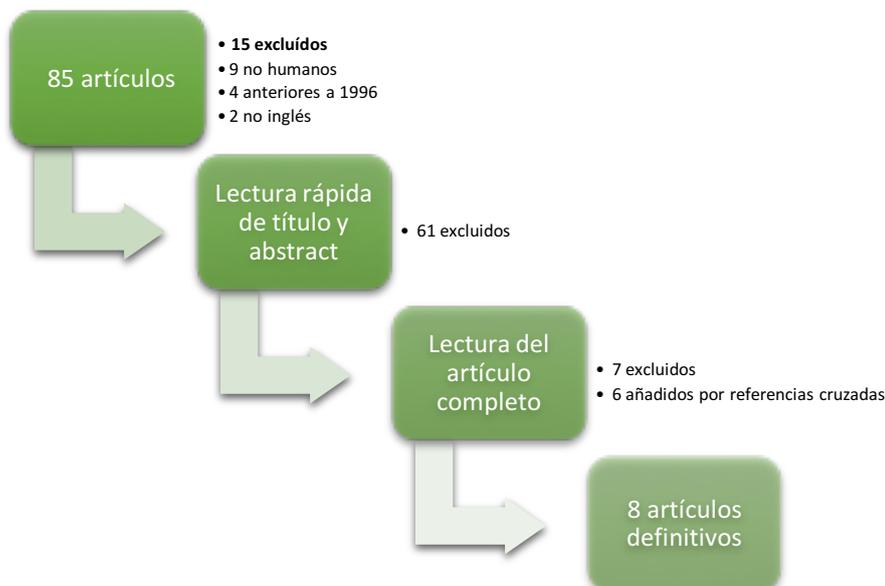
Todos los artículos encontrados se exportaron a un editor de referencias (Mendeley), donde se realizó una revisión tanto del título como del resumen para descartar aquellos que claramente no cumplieran con los criterios de inclusión. Posteriormente se realizó una revisión de forma exhaustiva de aquellos artículos que sí cumplían los criterios.

De la búsqueda inicial en la base de datos PubMed se obtuvieron 85 artículos (*figura 1*). Posteriormente, fueron eliminados aquellos estudios que no habían sido llevado a cabo en humanos, que eran anteriores a 1996 y que no estaban en lengua inglesa, quedando 70 trabajos.

Se procedió a la lectura de título y resumen de los 70 artículos obtenidos en la búsqueda, descartando 61, ya que la mayor parte de ellos trataban de temas relacionados con el ámbito clínico y no cumplían claramente con los criterios de inclusión. Se dejaron 9 artículos para su revisión completa. Tras dicha revisión, solo 2 artículos fueron incluidos porque trataban explícitamente sobre el uso de algoritmos para la individualización de la HRV.

Además, se añadieron 6 artículos de forma cruzada, gracias a las referencias de otros trabajos leídos con los cuales se pudo redactar la introducción (*figura 1*)

Figura 1: Proceso de selección.



3. RESULTADOS

Tabla 1: Resumen de los artículos que hacen uso de la HRV en la dirección del proceso de entrenamiento.

Autor	Intervención	Sujetos	Grupos	Variable usada	Valoración	Momento registro	Duración registro	Medida basal	Fórmula SWC
Javaloyes et al. (2019)	12 semanas (4+8Tr)	17	HRV = 8 TRAD = 9	LnRMSSD 7day-roll-avg	sup	mañana	90"	SWC (4 semanas)	$\pm 0'5 \times SD$
Kiviniemi et al. (2007)	4 semanas	26	HRV = 9 TRAD = 8 CONTROL = 9	HF	seat + stand	mañana	300" seat + 300" stand	MM10días	SDI
Nuutila et al. (2017)	8 semanas	24	HRV = 13 PRED = 11	RMSSD	sup	mañana	180"	N/A	N/A
Vesterinen et al. (2016)	12 semanas (4+8Tr)	31	HRV = 13 TRAD = 18	RMSSD 7day-roll-avg	sup + stand	mañana	240"	SWC (4 semanas)	$\pm 0'5 \times SD$
Schmitt et al. (2018)	2 semanas	29	HRV = 9 PREDH = 9 PREDN = 6	HF	sup	mañana	480" sup + 420" stand	día anterior	30%*
Da Silva et al. (2019)	11 semanas (3+8Tr)	30	HRV = 15 PRED = 15	RMSSD	seat + stand	rest	120" seat + 180" stand	MM10d	SDI
Kiviniemi et al. (2010)	8 semanas	38	♂HRV = 7 ♂TRAD = 7 ♀HRV1 = 7 ♀HRV2 = 10 ♀TRAD = 7	SD	seat + stand	mañana	120" seat + 180" stand	MM10d	N/A
Saboul et al. (2019)**		45	CARD = 15 SED = 15 ATH = 15	RMSSD	N/A	mañana	RMSSD 300" RMSSDadjust 180"	CV	CV <0'5%

HRV: grupo guiado por la HRV; PRED/TRAD: grupo guiado por un entrenamiento predefinido; CARD: pacientes con infarto de miocardio; SED: sedentarios; ATH: atletas de nivel nacional; sup: posición decúbico supino; seat: sentado; stand: de pie; rest: en reposo; SWC: Smallest Wortwhile Change; SD: desviación estándar; SDI:MM10d: media móvil de los últimos 10 días;

3.1 Resultados de los artículos.

Todos los estudios analizan estrictamente el proceso de entrenamiento guiado mediante la HRV, excepto el de Saboul et al., (2019) que propone un nuevo algoritmo para reducir e individualizar al máximo el tiempo de registro según el tipo de sujeto.

Las duraciones de las intervenciones de los estudios van de las 2 a las 12 semanas con una muestra de entre 17 y 38 sujetos. Todos, excepto el de Saboul et al., (2019) dividen a los sujetos mínimo en dos grupos, uno con entrenamiento guiado por HRV y otro con entrenamiento predefinido (PRED o TRAD) independientemente de la asimilación de las cargas de entrenamiento.

El nivel de los sujetos es variado, solo uno interviene sobre un tipo de población desentrenada (Da Silva et al., 2019), cuatro lo hacen sobre deportistas de nivel amateur (Kiviniemi et al., 2007; Kiviniemi et al., 2010; Nuutila et al., 2017; Vesterinen et al., 2016) y otros dos sobre deportistas altamente entrenados o élite (Javaloyes et al., 2019; Schmitt et al., 2018).

Medición de la HRV

Los protocolos de medición son todos diferentes, salvo el de Da Silva et al. (2019) que se basa en el propuesto por Kiviniemi et al., (2010). Lo que tienen en común todos los artículos es que la medición se hacía por la mañana. Sin embargo, el trabajo de Da Silva et al. (2019) no especifica el momento del registro, solo se menciona que es descansado y antes del entrenamiento.

En cuanto a la posición de registro, algunos lo hacen en posición supina (sup), otros sentados (sit) y otros combinando varias posiciones; sentado + de pie (sit + stand) o supino + de pie (sup + stand).

El registro más corto es de 90" (Javaloyes et al., 2019), que ocasiona una mayor adherencia por parte del deportista, y el registro de mayor duración es el propuesto por Schmitt et al., (2018) que dura 15 minutos (8' sup + 7' stand).

Como medida basal entendemos al valor o rango de referencia que cada autor instauro como el límite para tomar decisiones del proceso de entrenamiento. El tema de la medida basal se tratará de abordar de manera más dilatada en la Discusión, ya que hay autores que toman como referencia medias móviles de 10 días (Kiviniemi et al., 2007; Kiviniemi et al., 2010; Da Silva et al., 2019), otros usan el SWC del RMSSD o del LnRMSSD (Vesterinen et al, 2016; Javaloyes et al., 2019) y uno de ellos toma como medida basal el dato del día anterior (Schmitt et al., 2018).

La fórmula usada para establecer el SWC, también es un tema de importancia que se tratará en el siguiente punto de este trabajo, así como el algoritmo o esquema para tomar decisiones. En cuanto a esto último, solo dos autores han propuesto algoritmos sólidos y replicados para guiar el entrenamiento en función de variabilidad de la frecuencia cardiaca diaria (Kiviniemi et al., 2007; Javaloyes et al., 2019)

4. DISCUSIÓN

Los dos objetivos de esta revisión bibliográfica son, en primer lugar, conocer los diferentes métodos propuestos en la bibliografía para calcular el SWC, si existe alguno que permita individualizar el proceso de dirección de entrenamiento y averiguar qué fundamentación tiene. En segundo lugar, revisar que algoritmos o esquemas de tomas de decisión se usan para guiar el entrenamiento diario (Day-to-Day) e implementarlo junto al mejor método de cálculo del SWC.

4.1 SWC (Smallest Wortwhile Change)

En cuanto al “Smallest Wortwhile Change”, todos los estudios expuestos en el presente trabajo que establecen una media basal basada en el SWC, tienen la limitación de que determinan ese rango usando el mismo criterio para todos los sujetos ($\text{media} \pm 0.5 \times \text{SD}$) propuesto por Plews, et al. (2012) y Plews et al., (2013), cuando se ha comprobado que la HRV presenta una alta variación inter-sujetos (Plews, Laursen & Buchheit, 2017).

Si el objetivo de la periodización guiada por la HRV es individualizar al máximo el proceso de entrenamiento (Kiviniemi et al., 2010; Vesterinen et al., 2016) se deberían proponer fórmulas según el tipo de deportista (experiencia, nivel etc..) para conseguir acotar el rango del SWC, habiéndose comprobado que las respuestas del LnRMSDD a la carga del entrenamiento son altamente individuales y que parecen estar relacionadas con la condición física individual (Flatt, Esco, Nakamura & Plews, 2017), comprobando que los niveles más altos de *fitness level* dan como resultado una tendencia más estable de LnRMSDD en relación con atletas de menor condición física (Flatt et al., 2017; Buchheit, Mendez-Villanueva, Quod, Poulos & Bourdon, 2010; Boullousa et al., 2013).

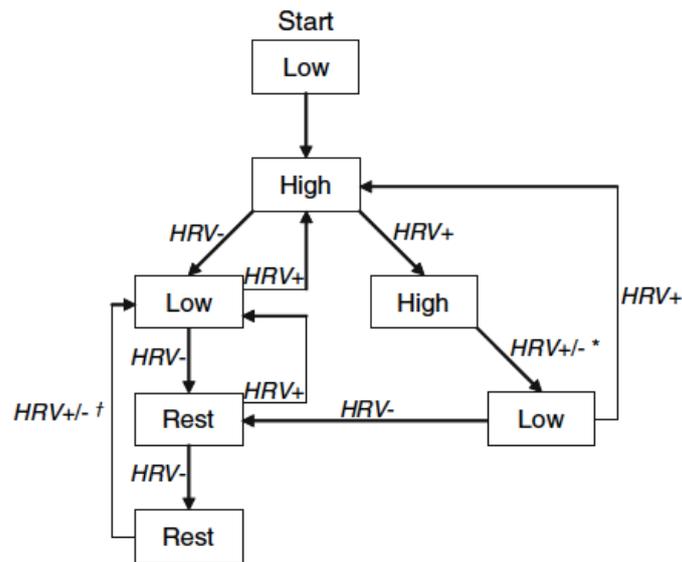
En base a lo expuesto anteriormente, autores como Javaloyes et al., (2019) argumentan que se necesita más investigación para individualizar el cálculo de SWC y que, para conseguir esta individualización, se debe como se ha argumentado anteriormente, adaptar el rango de la fórmula o bien la longitud de los datos necesarios para su cálculo.

Buscar nuevas fórmulas de cálculo del SWC sería una línea interesante de investigación, ya que la HRV aplicada al deporte es un mundo aún por descubrir e indagar, es por ello que recientemente están surgiendo nuevos algoritmos que buscan individualizar al máximo variables como el tiempo de registro basado en el CV de cada sujeto, con el principal objetivo de reducir el tiempo invertido en medir la HRV (Saboul et al., 2019)

4.2 Algoritmo

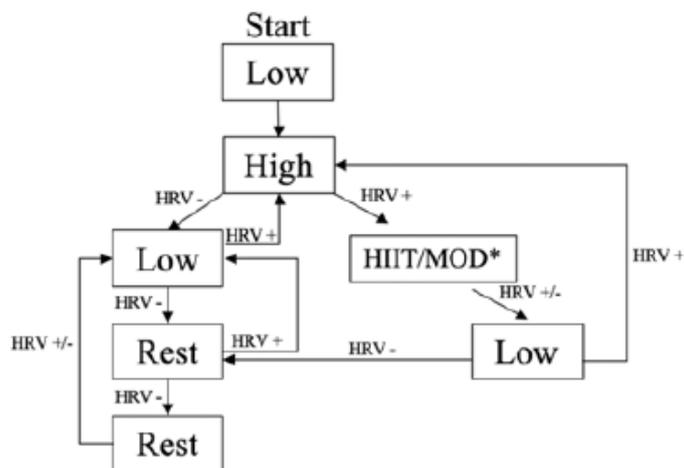
Por otra parte, tampoco se ha encontrado en la literatura un algoritmo o esquema de toma de decisiones basado en HRV que tenga una fundamentación científica detrás. Kiviniemi et al., (2007) propusieron la idea básica de realizar un entrenamiento de baja intensidad cuando decrecía la HRV por debajo del límite inferior de la SD (SDI) de la media móvil de los últimos 10 días (MM_{10d}). Si la HRV se mantenía o crecía, se realizaba un entrenamiento de alta intensidad (HIIT), hasta un máximo de dos días consecutivos (*ver figura 2*). Una de las principales limitaciones que podemos apreciar es que se toma el propio valor diario para ver si entra, o no, dentro del rango, cuando se ha comprobado que es mejor una media móvil de los 7 días ($7_{\text{roll-avg-day}}$) ya que es menos sensible que los valores simples, por la gran variación que estos últimos presentan (Plews & Laursen, 2013).

Figura 2: Algoritmo de toma de decisiones basado en la HRV propuesto por Kivieniemi et al. 2007.



Recientemente, Javaloyes et al., (2019) presentaron un nuevo algoritmo basado en el propuesto anteriormente por Kivieniemi et al., (2007) (ver figura 3). Este nuevo algoritmo salva, a nuestro juicio, las limitaciones del anterior, ya que toma como medida basal el SWC de 4 semanas y usa como variable diaria para decidir la media móvil de 7 días del LnRMSSD ($\text{LnRMSSD}_{7\text{day-roll-avg}}$) siguiendo las recomendaciones de autores de relevancia (Plews & Laursen, 2013). Además, modifica la sesión siguiente a un día de entrenamiento HIIT si $\text{LnRMSSD}_{7\text{day-roll-avg}}$ se encuentra dentro de SWC, pudiendo elegir entre un entrenamiento de intensidad moderada (MOD) o HIIT. Esta modificación del algoritmo podría haberse realizado para adaptarse a las deportistas féminas, ya que éstas son más susceptibles en recuperar su HRV después de un entrenamiento HIIT y podrían lograr mejoras similares en la condición cardiovascular al realizar un entrenamiento de intensidad menos vigorosa (Kivieniemi et al., 2010)

Figura 3: Algoritmo de toma de decisiones basado en la HRV propuesto por Javaloyes et al. 2019.



Cuando el $\text{LnRMSSD}_{7\text{day-roll-avg}}$ se encuentra dentro del SWC (+), se prescriben sesiones de entrenamiento de moderada (MOD) o alta intensidad (HIIT). Si el $\text{LnRMSSD}_{7\text{day-roll-avg}}$ se encuentra fuera del SWC (-) se prescribe entrenamiento de baja intensidad (Low) o descanso (Rest). *Las sesiones de MOD y HIIT se alternaban cada semana.

Aunque el algoritmo de Javaloyes et al., (2019) suponga un avance, carece de la suficiente fundamentación científica. Es por ello que el propio autor concluye que se necesita investigar para ampliar el conocimiento hacia nuevos esquemas o algoritmos que permitan prescribir sesiones de entrenamiento de forma más individualizada (Javaloyes et al., 2019)

5. CONCLUSIÓN

El uso de la variabilidad de la frecuencia cardiaca en la dirección del proceso de entrenamiento, parece ser útil para maximizar el rendimiento de los deportistas a la vez que, para mejorar los hitos fisiológicos, no obstante, no existe en la literatura ningún algoritmo con fundamentación científica que sea capaz de ser aplicado e individualizado al tipo de deportista.

6. PROPUESTA DE INTERVENCIÓN

Con el objetivo de profundizar en las limitaciones de los anteriores estudios, se propone una intervención centrada en aplicar nuevas metodologías para el cálculo del SWC individualizado, que fundamente un nuevo algoritmo de toma de decisiones más preciso en el proceso de entrenamiento.

La mayor parte de los estudios revisados han utilizado como muestra a corredores, triatletas, remeros, ciclistas o participantes entrenados en deportes cíclicos de larga duración. La intervención propuesta seguirá la línea de Javaloyes et al., (2019) y se realizará sobre ciclistas experimentados de categoría Sub23-Élite, ya que se tiene más accesibilidad a esa muestra poblacional.

6.1 Diseño de la intervención.

En el estudio intervendrán 40 ciclistas U23-Élite. La intervención durará 10 semanas (figura 4) 2 semanas de familiarización y 8 semanas de entrenamiento guiado. Las 2 primeras semanas todos los ciclistas realizarán un entrenamiento predefinido (PRED) y se familiarizarán con el protocolo de registro diario de la HRV, que servirá a su vez para establecer la línea basal y el SWC. Las 8 últimas semanas de intervención el entrenamiento será guiado por la HRV, si bien cada grupo usará una variable diferente para tomar decisiones de su entrenamiento diario.

Figura 4: Periodización de la intervención

SEMANA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	CÁLCULO SWC									
TIPO INTERVENCIÓN	FAMILIARIZACIÓN		ENTRENAMIENTO GUIADO							
GRUPO 1	entrenamiento predefinido		GHRV-SD1: individualizado según RMSSD con algoritmo de Kiviniemi et al.							
GRUPO 2			GHRV-SD2: individualizado según RMSSD con algoritmo de Javaloyes et al.							
GRUPO 3			GHRV-CV1: individualizado según CV de RMSSD con algoritmo de Kiviniemi et al.							
GRUPO 4			GHRV-CV2: individualizado según CV de RMSSD con algoritmo de Javaloyes et al.							

Los ciclistas se dividirán en cuatro grupos (10 por grupo) por pares aleatorizados en función de sus características fisiológicas y determinantes del rendimiento. Dos de los grupos (GHRV-SD1 y GHRV-SD2) seguirán el entrenamiento basado en la variable RMSSD transformada al logaritmo natural (LnRMSSD) e insertando el dato diario dentro de una media móvil de 7 días (LnRMSSD_{7day-roll-avg}) para prescribir entrenamiento en función de si entra, o no, dentro de la línea basal (SWC) calculada como la media $0,5 \times SD$. Para el primero se utilizará el algoritmo de Kiviniemi et al. (2007) Y para el otro grupo el de Javaloyes et al. (2019). Los otros dos grupos (GHRV-CV1 y GHRV-CV2) basarán su entrenamiento en la variable del coeficiente de variación del LnRMSSD (LnRMSSD_{cv}). Para el primero se utilizará el algoritmo de Kiviniemi et al. (2007) Y para el otro el de Javaloyes et al. (2019).

Se realizarán 2 evaluaciones, 1 tras las dos primeras semanas de entrenamiento común y otra al finalizar las 8 semanas de entrenamiento guiado. Las evaluaciones constarán de una antropometría, un test incremental hasta el fallo con análisis ventilatorio y una prueba específica de rendimiento (40 minutos TT). La sucesión cronológica de las mismas será: primero la antropometría, segundo el test incremental y a las 48 horas el 40'TT.

6.2 Evaluaciones

Antropometría

Se realizará una valoración antropométrica siguiendo el protocolo de valoración de la composición corporal propuesto en el documento de consenso del Grupo Español de Cineantropometría (GREC) (Alvero Cruz et al., 2009) y cumpliendo con los estándares internacionales elaborados por la International Society for Advancement in Kinanthropometry (ISAK). A través del protocolo propuesto por el GREC se miden los perímetros musculares, pliegues de grasa y diámetros óseos para establecer el somatotipo del deportista. Los datos obtenidos (% de grasa, % de masa muscular, % de masa ósea etc..) permitirán llevar a cabo un seguimiento para comparar los resultados pre y post intervención. Materiales usados para la antropometría: Tallímetro, Báscula digital (Tanita), Paquímetro (Cescorf®), Cinta antropométrica (Cescorf®), Plicómetro (Holtain Ltd, Crymych, UK®).

Test incremental (GXT)

El primer test se hará para evaluar sus valores de consumo máximo de oxígeno (VO₂Máx), sus umbrales ventilatorios (VT1 y VT2), su potencia aeróbica máxima (PAM) y la potencia generada tanto en el umbral ventilatorio 1 (PVT1) como en el umbral ventilatorio 2 (PVT2). Consistirá en realizar una prueba incremental maximal (GXT del inglés *Graded Exercise Test*) con su propia bicicleta y mediante analizador de gases MasterScreen CPX (Jaeger Leibniztrasse 7, 97204 Hoechberg, Germany). El GXT comienza con 10' de calentamiento a 50 watts (w) con incrementos progresivos de 25w·min hasta la extenuación. Se registrarán todos los datos obtenidos y se analizarán los valores mencionados anteriormente.

Test de rendimiento específico (40TT)

Consistirá en una prueba contrarreloj de 40 minutos (40TT) en laboratorio, con un calentamiento (WU) previo de 10 minutos a 50W. Se realizará con cadencia libre tanto en el WU como los 40TT. De los 40 minutos de contrarreloj se obtendrá la potencia media (W) y la potencia normalizada (NP) para poder determinar el rendimiento del ciclista.

Tanto el GXT como el 40TT se realizarán sobre su bicicleta habitual con un rodillo *Wahoo Kickr Power Trainer* (Wahoo Fitness, Atlanta, GA), recientemente validado (Zadow, Kitic, Wu, Smith & Fell, 2016)

6.3 Registro HRV

Se instruirá a los ciclistas a tomar el registro diario de HRV de forma autónoma, éste se realizará por la mañana al despertarse y después de haber vaciado la vejiga. Para facilitar el registro se usará *HRV4TRAINING* (ver <http://www.hrv4training.com>), aplicación validada (Plews & Scott, 2017) desarrollada por el Dr Marco Altini, que usa la técnica de fotopleiografía mediante la cámara de un Smartphone y que tiene una buena aceptación por parte de los deportistas por su facilidad de uso.

La duración del registro será de 90" en posición decúbito supino, siguiendo las recomendaciones de Esco & Flatt (2014). Tras la toma, la propia aplicación envía automáticamente los resultados obtenidos a la nube para ser analizado posteriormente mediante la plataforma HRV4TrainingPro y los entrenamientos son modificados haciendo uso del software TrainingPeaks.

6.4 Entrenamiento

Las 2 primeras semanas todos los participantes seguirán una periodización predefinida, independientemente de los resultados de HRV obtenidos. Después se aleatorizará por los valores de sus test a los participantes en 4 grupos que continuarán con una periodización similar guiado en función de su HRV (GHRV-SD1 y GHRV-SD2) y del coeficiente de variación de su HRV (GHRV-CV1 y GHRV-CV2). Para ello se realizará una media móvil de los últimos 7 días de los valores del RMSSD (GHRV-SD) y del coeficiente de variación de RMSSD (GHRV-CV). Dependiendo del valor obtenido del SWC y el valor de la media móvil, cada grupo tomará decisiones sobre su entrenamiento utilizando, los subgrupos 1 el algoritmo de Kiviniemi et al. (2007) y los subgrupos 2 el propuesto por Javaloyes et al. (2019).

Tratamiento estadístico

Al finalizar la intervención se realizará un tratamiento estadístico de los datos presentados como promedio \pm SD. Se realizará una prueba de normalidad de los datos. Posteriormente, se realizará una ANOVA de medidas repetidas, utilizando como factor entre sujetos el grupo de entrenamiento y como factor intrasujeto las variables de entrenamiento y rendimiento. Se calcularán los tamaños del efecto con la *d* de Cohen y se presentarán con sus intervalos de confianza al 95%. Se utilizará el software SPSS 22.0 para todo el tratamiento estadístico de los datos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Alvero Cruz, J. R., Cabañas Armesilla, M. D., Herrero de Lucas, A., Martínez Riaza, L., Moreno Pascual, C., Porta Manzañido, J., Sirvent Belando, J. E. (2009). Protocolo de valoración de la composición corporal para el reconocimiento médico-deportivo. Documento de consenso del grupo español de cineantropometría de la federación española de medicina del deporte. *Archivos de Medicina Del Deporte*.
- Boullosa, D. A., Abreu, L., Nakamura, F. Y., Muñoz, V. E., Domínguez, E., & Leicht, A. S. (2013). Cardiac autonomic adaptations in elite spanish soccer players during preseason. *International Journal of Sports Physiology and Performance*.
<https://doi.org/10.1123/ijsp.8.4.400>
- Buchheit, M. (2014). Monitoring training status with HR measures: Do all roads lead to Rome? *Frontiers in Physiology*. <https://doi.org/10.3389/fphys.2014.00073>
- Buchheit, M., Mendez-Villanueva, A., Quod, M. J., Poulos, N., & Bourdon, P. (2010). Determinants of the variability of heart rate measures during a competitive period in young soccer players. *European Journal of Applied Physiology*.
<https://doi.org/10.1007/s00421-010-1422-x>
- da Silva, D. F., Ferraro, Z. M., Adamo, K. B., & Machado, F. A. (2019). *Endurance Running Training Individually Guided by HRV in Untrained Women*. *Journal of strength and conditioning research* (Vol. 33). <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002001>
- Esco, M. R., & Flatt, A. A. (2014). Ultra-short-term heart rate variability indexes at rest and post-exercise in athletes: Evaluating the agreement with accepted recommendations. *Journal of Sports Science and Medicine*.
- Flatt, A. A., & Esco, M. R. (2015). Smartphone-Derived Heart-Rate Variability and Training Load in a Women's Soccer Team. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10(8), 994–1000. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2014-0556>
- Flatt, A. A., & Esco, M. R. (2016). Heart rate variability stabilization in athletes: towards more convenient data acquisition. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 36(5), 331–336. <https://doi.org/10.1111/cpf.12233>
- Flatt, A. A., & Howells, D. (2019). Effects of varying training load on heart rate variability and running performance among an Olympic rugby sevens team. *Journal of Science and Medicine in Sport*. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2018.07.014>
- Flatt, A. A., Esco, M. R., Nakamura, F. Y., & Plews, D. J. (2017). Interpreting daily heart rate variability changes in collegiate female soccer players. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 57(6), 907–915. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.16.06322-2>
- Javaloyes, A., Sarabia, J. M., Lamberts, R. P., & Moya-Ramon, M. (2019). Training Prescription Guided by Heart-Rate Variability in Cycling. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14(1), 23–32. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0122>

- Kiviniemi, A. M., Hautala, A. J., Kinnunen, H., & Tulppo, M. P. (2007). Endurance training guided individually by daily heart rate variability measurements. *European Journal of Applied Physiology*. <https://doi.org/10.1007/s00421-007-0552-2>
- Kiviniemi, A. M., Hautala, A. J., Kinnunen, H., Nissilä, J., Virtanen, P., Karjalainen, J., & Tulppo, M. P. (2010). Daily exercise prescription on the basis of HR variability among men and women. *Medicine and Science in Sports and Exercise*.
- Nuutila, O. P., Nikander, A., Polomoshnov, D., Laukkanen, J. A., & Häkkinen, K. (2017). Effects of HRV-Guided vs Predetermined Block Training on Performance, HRV and Serum Hormones. *International Journal of Sports Medicine*. <https://doi.org/10.1055/s-0043-115122>
- 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. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11039645>
- Plews, D. J., Laursen, P. B., & Buchheit, M. (2017). Day-to-day heart-rate variability recordings in world-champion rowers: Appreciating unique athlete characteristics. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0343>
- Plews, D. J., Laursen, P. B., Kilding, A. E., & Buchheit, M. (2013). Evaluating training adaptation with heart-rate measures: a methodological comparison. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 8(6), 688–691. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23479420>
- Plews, D. J., Laursen, P. B., Kilding, A. E., & 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. <https://doi.org/10.1007/s00421-012-2354-4>
- Plews, D. J., Laursen, P. B., Le Meur, Y., Hausswirth, C., Kilding, A. E., & Buchheit, M. (2014). Monitoring training with heart-rate variability: How much compliance is needed for valid assessment? *International Journal of Sports Physiology and Performance*. <https://doi.org/10.1123/IJSP.2013-0455>
- Plews, D. J., Scott, B., Altini, M., Wood, M., Kilding, A. E., & Laursen, P. B. (2017). Comparison of heart-rate-variability recording with smartphone photoplethysmography, polar H7 chest strap, and electrocardiography. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0668>
- Rodas, G., Pedret J, Cr., & Capdevila, L. (2008). Variabilidad de la frecuencia cardíaca: concepto, medidas y relación con aspectos clínicos (I). *Arch Med Deporte*.
- Saboul, D., & Hautier, C. (2019). A New Algorithm to Reduce and Individualize HRV Recording Time. *Journal of Medical Systems*, 43(3), 45. <https://doi.org/10.1007/s10916-019-1167-y>
- Saboul, D., Pialoux, V., & Hautier, C. (2013). The impact of breathing on HRV measurements: Implications for the longitudinal follow-up of athletes. *European Journal of Sport Science*. <https://doi.org/10.1080/17461391.2013.767947>

- Schmitt, L., Regnard, J., Desmarests, M., Mauny, F., Mourot, L., Fouillot, J. P., ... Millet, G. (2013). Fatigue Shifts and Scatters Heart Rate Variability in Elite Endurance Athletes. *PLoS ONE*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071588>
- Schmitt, L., Willis, S. J., Fardel, A., Coulmy, N., & Millet, G. P. (2018). Live high–train low guided by daily heart rate variability in elite Nordic-skiers. *European Journal of Applied Physiology*, 118(2), 419–428. <https://doi.org/10.1007/s00421-017-3784-9>
- Task Force of The European Society of Cardiology and The North American Electrophysiology Society of Pacing and Electrophysiology. (1996). Guidelines Heart rate variability. *European Heart Journal*, 354–381. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.93.5.1043>
- Vesterinen, V., Nummela, A., Heikura, I., Laine, T., Hynynen, E., Botella, J., & Häkkinen, K. (2016). Individual Endurance Training Prescription with Heart Rate Variability. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000910>
- Zadow, E. K., Kitic, C. M., Wu, S. S. X., Smith, S. T., & Fell, J. W. (2016). Validity of power settings of the wahoo KICKR power trainer. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0733>

