

Article

Entrenamiento Intervalado de Alta Intensidad, Soluciones para el Puzle de la Planificación Parte 1: Énfasis Cardiopulmonar

Martin Buchheit y Paul B. Laursen

RESUMEN

El entrenamiento intervalado de alta intensidad (HIT), en una variedad de formas, es a día de hoy uno de los medios más eficaces de mejorar la función cardiorrespiratoria y metabólica, y por ello, el rendimiento físico de los deportistas. HIT implica repetir series de ejercicio cortas o largas de bastante alta intensidad intercaladas con periodos de recuperación. Para jugadores de deportes de equipo o raqueta, la inclusión de sprints y esfuerzos all-out en programas HIT también se ha mostrado una práctica efectiva. Se cree que un estímulo óptimo para obtener tanto adaptaciones cardiovasculares como periféricas máximas es aquel en el que los atletas pasan al menos varios minutos por sesión en su “zona roja”, la cual generalmente significa alcanzar al menos el 90% de su consumo de oxígeno máximo ($\text{VO}_{2\text{max}}$). Mientras que el uso del HIT no es el único enfoque para mejorar parámetros fisiológicos y el rendimiento, ha habido un interés creciente por parte de la comunidad de ciencias del deporte por caracterizar los protocolos de entrenamiento que permiten a los atletas mantener largos periodos de tiempos sobre el 90% del $\text{VO}_{2\text{max}}$ ($\text{T@VO}_{2\text{max}}$). Además del $\text{T@VO}_{2\text{max}}$, otras variables fisiológicas deberían tenerse en cuenta para caracterizar completamente el estímulo del entrenamiento cuando se programa HIT, incluyendo trabajo cardiovascular, contribución energética anaeróbica glicolítica y carga neuromuscular aguda y estrés musculoesquelético. Prescribir HIT conlleva manipular hasta nueve variables, que incluyen la intensidad y duración del periodo de trabajo, intensidad y duración del intervalo de descanso, modalidad deportiva, número de repeticiones, número de series, además de la duración e intensidad de la recuperación entre series. La manipulación de alguna de estas variables puede afectar a las respuestas fisiológicas del HIT. Este artículo es la Parte 1 de una siguiente Parte 2 de una revisión, y analizará diferentes aspectos de la programación del HIT, desde la manipulación del intervalo de trabajo y descanso, hasta la selección del tipo de ejercicio, usando diferentes ejemplos de entrenamiento de diferentes deportes, con una continua referencia al $\text{T@VO}_{2\text{max}}$ y a las respuestas cardiovasculares. Adicionalmente analizaremos consideraciones de programación y periodización como la contribución del sistema glicolítico anaeróbico (inferido por la acumulación de lactato en sangre), la carga neuromuscular y el estrés musculo-esquelético (Parte II).

1. INTRODUCCIÓN:

Con respecto a la prescripción de entrenamiento para la mejora del rendimiento, los entrenadores saben que “hay más de una forma de despellejar al gato” (1). Revisiones recientes (1,2) resaltan el potencial de variar la cantidad de entrenamiento intervalado de alta intensidad (HIT) y alto volumen de entrenamiento continuo, entrenamiento de baja intensidad sobre el rendimiento en atletas altamente entrenados. No hay dudas de que ambos tipos de entrenamiento

pueden efectivamente mejorar la función cardiaca y metabólica del musculo esquelético, y que una dosis de ambos tipos de entrenamientos son importantes en el programa de entrenamiento del atleta, pero en esta revisión nos centraremos solamente en el HIT. De hecho, en la última década han surgido muchos estudios sobre esta área, y tal vez no resulte sorprendente que hoy en día el entrenamiento de HIT en carrera y ciclismo es una de las formas más efectivas de mejorar el rendimiento físico de los deportistas (3-6). "HIT implica periodos tanto cortos como largos de ejercicio a alta intensidad intercalado de periodos de recuperación" (3), y ha sido utilizado por deportistas desde hace casi un siglo. Por ejemplo, en 1920, Paavo Nurmi, uno de los mejores corredores de media y larga distancia del mundo en la época, utilizó algunas formas de HIT en sus rutinas de entrenamiento. Emil Zatopek contribuyó más tarde, en los años 1950, a la popularización de este formato de entrenamiento específico (ver Billat (3) para una historia más detallada del HIT). La progresiva aparición de esta forma de entrenamiento entre los deportistas de élite es la primera evidencia de su efectividad (i.e. teoría "mejor práctica" (2). Más recientemente, el uso de sprints y esfuerzos *all-outs* ha emergido también, ambos desde la aplicación (deportes de equipo) en campo y en el laboratorio (7-9). Estas particulares formas intensas de HIT incluyendo entrenamientos de sprints repetidos (RST; sprints de 3 a 7 segundos, separados de periodos de recuperación generalmente de no más de 60 seg.) o entrenamiento intervalado de sprint (SIT; esfuerzos de 30 seg. *all-out* con periodos de pausa pasiva de 2 a 4 min).

Siguiendo los experimentos pioneros de Hill en los años 1920 (Hill incluía ejercicios intermitentes en sus primeros estudios (2)), Astrand & Co-Autores publicaron algunas investigaciones clásicas en los años 1960 sobre las respuestas fisiológicas del HIT, lo cual creó las primeras bases científicas para intervalos de larga (10) y de corta duración (11, 12). Estudios de Balsom et al. seguidos en los años de 1990, enfatizaron en esfuerzos *all-out* (13). Como se detallará en la revisión, la mayor parte del trabajo científico que siguió a estos estudios en los últimos 20 a 50 años ha sido una extensión de estos hallazgos utilizando la nueva tecnología en el campo (i.e. dispositivos más precisos y portátiles). Sin embargo, las respuestas y mecanismos importantes del HIT ya se habían demostrado (10-12).

Se ha sugerido que los protocolos de HIT estimulan el consumo máximo de oxígeno (VO_{2max}), o al menos un porcentaje muy alto del VO_{2max} , maximizando el estrés sobre el transporte y utilización del oxígeno, lo que puede conllevar a ser el estímulo más efectivo para aumentar el VO_{2max} (5, 14, 15). Mientras que la evidencia para justificar la necesidad de ejecutar con tal intensidad no está clara, se puede argumentar que solo los ejercicios cerca del VO_{2max} permiten tanto el reclutamiento de gran cantidad de unidades motoras (i.e. Fibras musculares de Tipo II) (16, 17), como lograr un consumo cardiaco muy cercano al máximo (ver sección 3.2), que, a su vez, indica conjuntamente una adaptación de la fibra muscular oxidativa y el aumento del miocardio (y, por tanto, VO_{2max}). Para un estímulo óptimo (y consiguientes adaptaciones cardiovasculares y periféricas), se cree que los deportistas deberían pasar al menos algunos minutos por sesión de HIT en su "zona roja", la cual, generalmente se encuentra sobre la intensidad del 90% del VO_{2max} (3, 5, 15, 18). Consecuentemente, a pesar de nuestro limitado conocimientos sobre la relación dosis-respuesta entre la carga de entrenamiento y los cambios inducidos en las capacidades físicas y el rendimiento (generalmente se muestran grandes diferencias inter-individuales (19, 20)), ha habido un crecimiento del interés de la comunidad científica del deporte por caracterizar protocolos que permitan mantener largos periodos de tiempo $>90\% VO_{2max}$ ($T@ VO_{2max}$; ver la revisión de Midgley and McNaughton (14)). En adición al $T@ VO_{2max}$, sin embargo, otras variables fisiológicas deberían también ser consideradas para caracterizar el estímulo de entrenamiento cuando se programa HIT (21-23). Cualquier sesión de entrenamiento desafiará, en diferentes niveles relativos al contenido del entrenamiento, tanto al metabolismo como al sistema neuromuscular/musculoesquelético (21, 22). El sistema metabólico se refiere a tres procesos integrados distintos pero estrechamente relacionados, incluyendo 1) La división de los fosfágenos almacenados (adenosin trifosfato [ATP] y fosfocreatina [PCr]); 2) El desglose anaeróbico de carbohidratos (producción anaeróbica glicolítica); y 3) La combustión de carbohidratos y grasas con presencia de oxígeno (metabolismo oxidativo, o sistema aeróbico) (184). Por lo tanto, es posible caracterizar con precisión las respuestas fisiológicas agudas de cualquier sesión de HIT, basándose en (a) la contribución respectiva de estos tres procesos metabólicos; (b) la carga neuromuscular; y (c) el daño musculoesquelético (Fig. 1, Parte 1). Bajo estos supuestos, consideramos los datos cardiorespiratorios (i.e. consumo de oxígeno; VO_{2max}), pero también el trabajo cardiovascular (24-27), el almacenaje de energía (28, 29) y el estrés cardiaco autónomo (30-33) responden como las principales variables de interés cuando programamos sesiones HIT (revisión Parte 1). Por lógica, la contribución anaeróbica glicolítica y la carga neuromuscular/daño musculoesquelético sean, probablemente, las variables secundarias más importantes a considerar cuando diseñamos una sesión HIT (Parte II).

Varios factores determinan la deseada respuesta fisiológica de una sesión HIT (y la posible próxima adaptación) (Fig. 1). El deporte que el deportista practica (i.e. especificidad de entrenamiento) y el perfil del atleta o la especialidad deportiva (Ej.: un corredor de 800m favorecerá una mayor proporción de "base anaeróbica" HIT comparado con un corredor de maratón (6)) deberían ser considerados primero en relación a las adaptaciones deseadas a largo plazo. En segundo lugar, y lo que es más importante a corto plazo, la periodización tenga probablemente más impacto en la prescripción de HIT. Muchas de las adaptaciones deseadas en el entrenamiento son probablemente dependientes del ciclo de entrenamiento (Ej.: el desarrollo genérico de la potencia aeróbica en fases iniciales de la pretemporada VS especificidad deportiva y más sesiones anaeróbicas en el inicio de la temporada competitiva de un deporte de equipo). Adicionalmente, para atletas que

entrenan dos veces al día, y/o en deportistas de deportes de equipo dónde los entrenamientos trabajan simultáneamente infinidad de sistemas metabólicos y neuromusculares (34), el estrés fisiológico asociado a una sesión dada de HIT necesita ser considerado en relación a las demandas físicas y técnico-tácticas de la sesión para evitar un sobreesfuerzo y permitir una adaptación apropiada (i.e. maximizar un estímulo de entrenamiento y minimizar el riesgo de lesión musculoesquelética). Existen varios enfoques (i.e. formato HIT) que, considerados aisladamente, logran una adaptación metabólica y/o neuromuscular similar. Sin embargo, la habilidad del entrenador de entender las respuestas agudas aisladas de varios formatos de HIT puede ayudar en la selección de la sesión de HIT más apropiada, y en el lugar y hora adecuada.

Al menos nueve variables pueden ser manipuladas para prescribir diferentes sesiones HIT (Fig. 2, (35)). La intensidad y duración de trabajo y los intervalos de descanso son los principales factores (10, 12). Además, el número de intervalos, el número de series, la duración de la recuperación entre series y la intensidad determinan el trabajo total desarrollado. La modalidad deportiva (i.e. correr VS ciclismo o remo, o línea recta VS subir o cambios de dirección corriendo) ha recibido hasta la fecha un limitado interés científico, pero está claro que representa una variable clave a considerar a la hora de programar HIT, especialmente para deportistas de deportes de equipo y de raqueta. La manipulación de cada variable aisladamente probablemente tenga impacto directo sobre la respuesta metabólica, cardiopulmonar y/o neuromuscular.

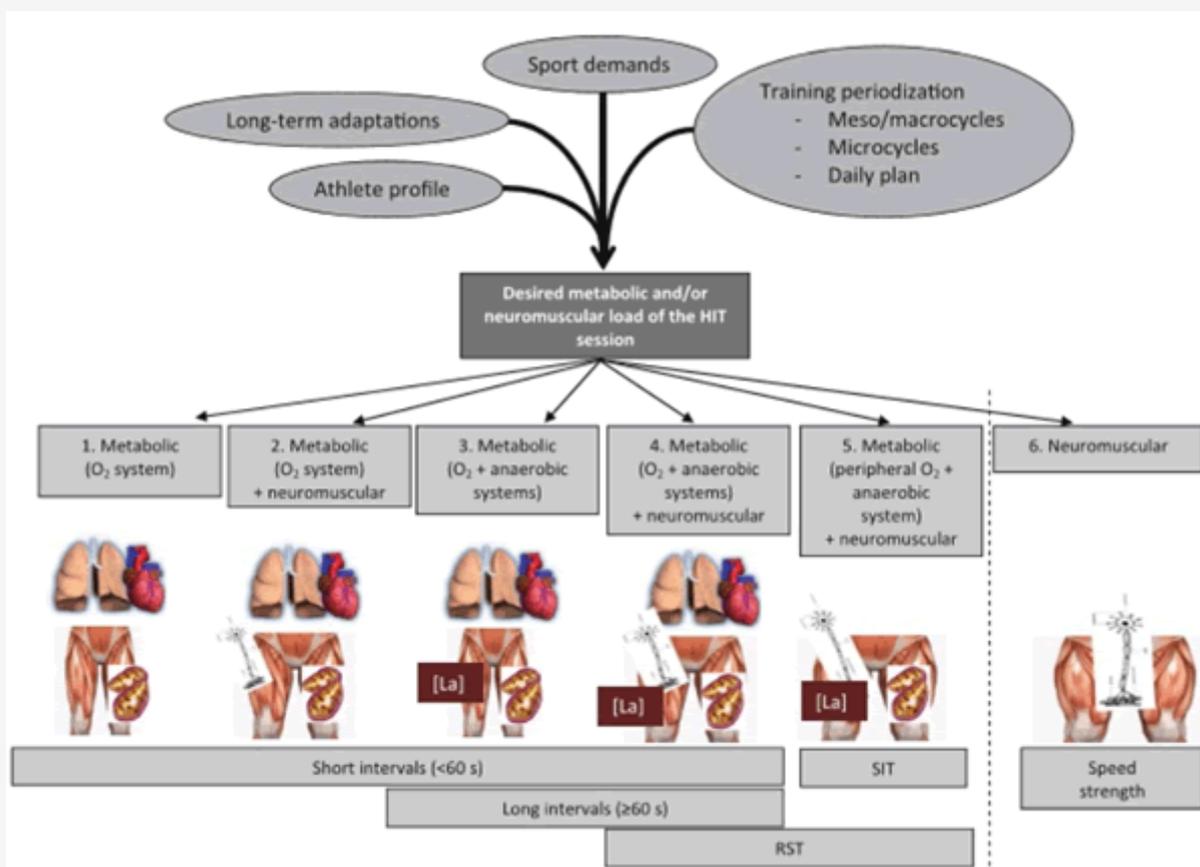


Figura 1. Proceso de selección de un formato de HIT basado en la respuesta/tensión fisiológica aguda esperada. Los seis tipos diferentes de respuesta agudas se dividen en: (1) Metabólica, pero obteniendo grandes requerimientos de los sistemas de transporte y utilización de O_{2max} , i.e. sistema cardiopulmonar y fibras musculares oxidativas; (2) metabólica como el (1) pero con cierto grado de tensión muscular; (3) metabólica como el (1) pero con gran contribución de energía anaeróbica glicolítica; (4) metabólica como el (3) más un cierto grado de carga neuromuscular; (5) metabólica con una importante contribución esencialmente de energía anaeróbica glicolítica y una gran carga neuromuscular, y (6) predominando una alta tensión muscular. Mientras que algunos formatos de HIT pueden ser utilizados haciendo coincidir diferentes categorías de respuesta (Ej.: intervalos cortos manipulados correctamente pueden encuadrar las categorías 1-4), SIT por ejemplo puede solo englobar la categoría 5. La categoría 6 no es detallada en la presente revisión ya que no se engloba dentro de ningún tipo de HIT en particular. HIT: entrenamiento intervalado de alta intensidad, [La]: acumulación de lactato en sangre; sustitutivo de la energía anaeróbica glicolítica tenemos RST: entrenamiento de sprint repetidos, SIT: entrenamiento intervalado de sprint.

Cuando más de una variable es manipulada simultáneamente, es más difícil predecir la respuesta, ya que los factores están inter-relacionados. Mientras nuestro conocimiento de cómo manipular estas variables está progresando junto al $T@VO_{2max}$, no sigue estando clara la combinación de duración e intensidad en los intervalos de trabajo para permitir a un deportista pasar un tiempo prolongado en $T@VO_{2max}$ mientras “se controla” el nivel de compromiso anaeróbico (3) y/o carga neuromuscular (revisar Parte II).

Teniendo en cuenta que las adaptaciones fisiológicas y de rendimiento a largo plazo del HIT son muy dependientes de la persona (edad, género, nivel de entrenamiento y experiencia) (19, 20), es difícil realizar recomendaciones de que formato de HIT es más eficiente.

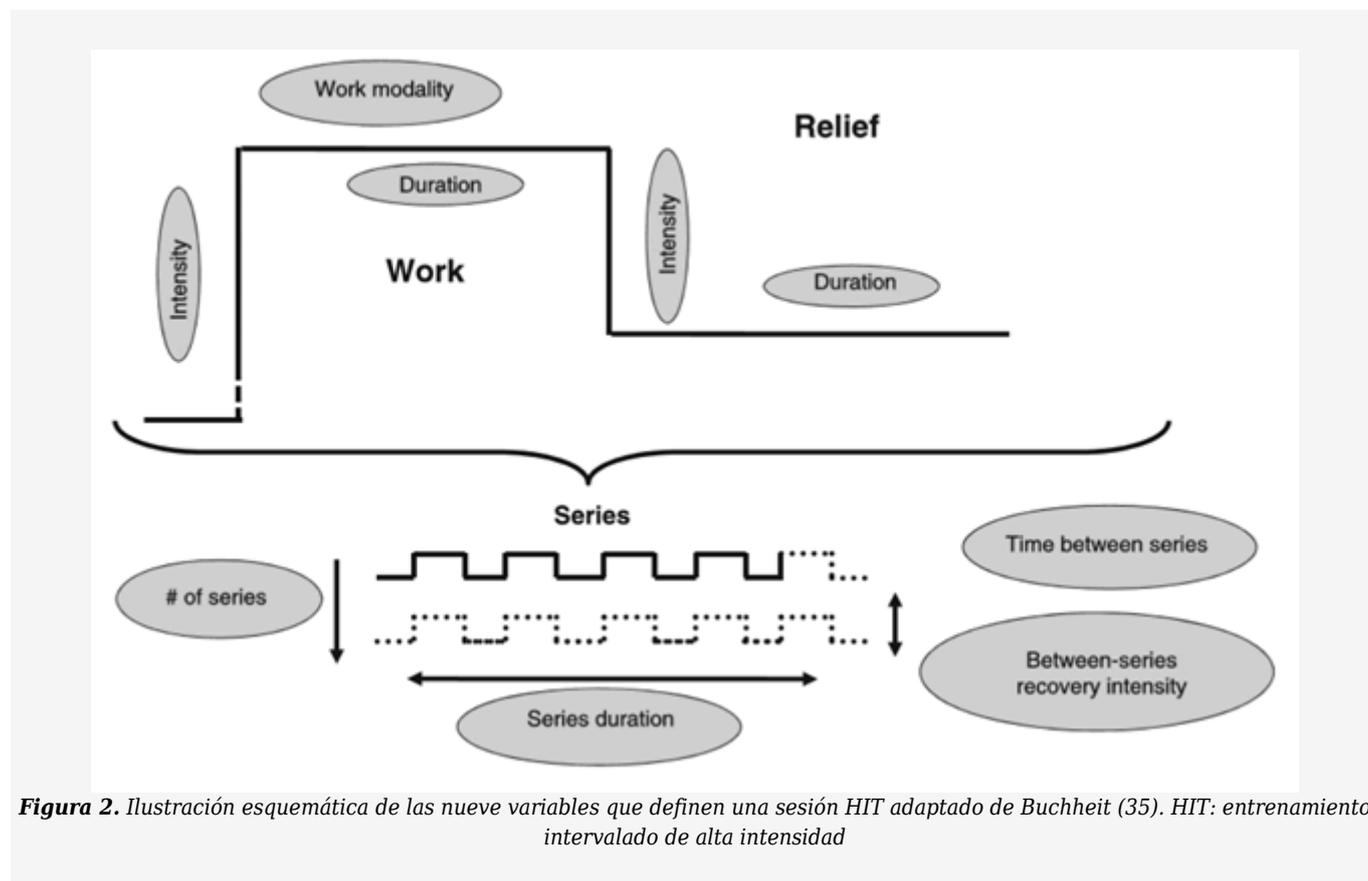


Figura 2. Ilustración esquemática de las nueve variables que definen una sesión HIT adaptado de Buchheit (35). HIT: entrenamiento intervalado de alta intensidad

Nosotros proporcionamos, sin embargo, en la Parte I de esta revisión, diferentes aspectos para programar HIT, como es la manipulación del intervalo de descanso y de trabajo para una modalidad deportiva, con una referencia continua al $T@VO_{2max}$ (i.e. tiempo pasado por encima del 90% VO_{2max}), lo que puede ayudar a individualizar la prescripción de HIT a diferentes tipos de deportistas. También se debatirán consideraciones de programación adicionales con respecto a otras variables, como respuestas cardiovasculares. Diferentes ejemplos de ciclos de entrenamiento de diferentes deportes pueden verse en la Parte II de esta revisión. Como se trata de una narrativa, y no una revisión sistemática, nuestros métodos incluyen una selección de los artículos que creíamos más relevantes en esta área. Dado que el objetivo principal de las sesiones de HIT es mejorar los determinantes del VO_{2max} , solo las sesiones HIT realizadas a una intensidad severa (i.e. intensidad superior al segundo umbral ventilatorio o máximo estado estable de lactato) se consideraron. Se ha dado prioridad a las respuestas agudas del HIT basado en carrera, ya que la mayoría de la literatura se ha basado en este modo de ejercicio. Sin embargo, es posible que la manipulación de estas mismas variables de HIT tenga efectos comparables en otros deportes (o modos de ejercicios, Ej.: ciclismo, remo, etc.), con la excepción de actividades sub-acuáticas que pueden necesitar una programación específica (36). Finalmente, creemos que las presentes recomendaciones son esencialmente adecuadas para deportistas de moderadamente entrenados a élite. Para poblaciones especiales (Ej.: sedentarios o problemas cardíacos), se remite al lector a revisiones recientes (37) e investigaciones originales (38-40). Diferencias estandarizadas (o efectos del trabajo; ES (41) han sido calculadas cuando ha sido posible para examinar los efectos respectivos de la manipulación de cada variable HIT, y interpretados usando el criterio de categorización de Hopkins, donde 0.2, 0.6, 1.2 y >2 son considerados “pequeño”, “medio”, “grande” y “muy grande” efectos respectivamente (42).

2. Prescripción de entrenamiento intervalado para atletas en el campo:

Para prescribir HIT y asegurar que los deportistas alcancen la intensidad requerida, existen varios enfoques para controlar e individualizar la velocidad/potencia del ejercicio en consecuencia. Analizaremos estos puntos e ilustraremos por qué, en nuestra opinión, utilizar parámetros de test incrementales son mucho más objetivos, prácticos y efectivos para lograr los resultados de rendimiento deseados.

2.1. Acercamiento a la pista y campo:

Para programar HIT para corredores de resistencia, tradicionalmente los entrenadores han utilizado velocidades específicas de carrera basadas en distancias variables de 800 a 5000m, pero sin utilizar marcadores fisiológicos como velocidades asociadas al $\dot{V}O_{2max}$ o umbrales de lactato o ventilatorios (3). Vale la pena mencionar, sin embargo, que los entrenadores y deportistas han tenido, y todavía lo tienen, un gran éxito usando este enfoque; una observación que debería humillar la fisiología del ejercicio. La atracción de este método es que todo el perfil locomotor (i.e. sprint máximo y velocidades aeróbicas, Fig. 3) del deportista puede ser usado para "formar" la sesión de HIT, de manera que cada carrera pueda ser realizada de acuerdo al potencial máximo del deportista. Mientras que para intervalos cortos (i.e. 10 a 60 seg) los tiempos de referencia de carrera pueden ser basados en porcentajes de su sprint máximo de 100-400m, la velocidad mantenida sobre los 800-1500m a 2000-3000m puede ser utilizada para calibrar intervalos más largos (Ej.; 2-4 a 6-8min). La desventaja de este enfoque, sin embargo, es que no permite al entrenador manipular conscientemente la carga fisiológica aguda de la sesión HIT, y conseguir una adaptación específica de un objetivo preciso (i.e. Fig. 1, cuando hay necesidad de mejorar una cualidad fisiológica y no solo para prepararse para una carrera). Además, este enfoque tiende a ser reservado a entrenadores altamente experimentados, para quienes conocen los mejores tiempos en carrera en varias distancias establecidas. La aplicación de este método a otros deportes es, sin embargo, difícil. Por ejemplo, ¿cómo puede determinar un entrenador el tiempo estimado en un 800m para un jugador de baloncesto de 2,10m de altura que nunca ha corrido más de 40seg de forma continua en una pista antes? Por lo tanto, usar el enfoque de pista y campo para deportistas de no-pista es poco probable que sea apropiado, práctico y efectivo.

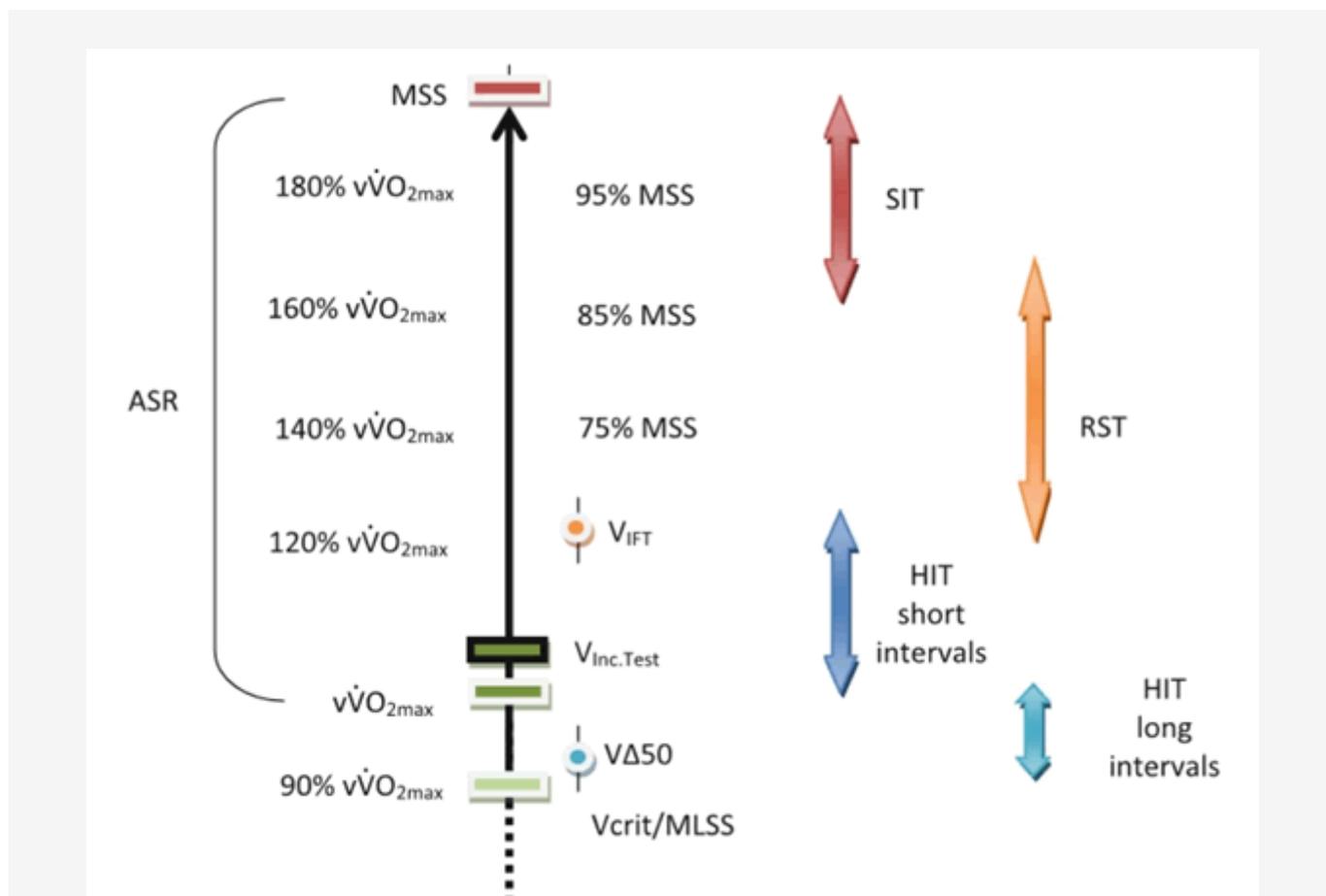


Figura 3. Rangos de intensidad utilizados por varios formatos de HIT basados en la carrera. ASR: velocidad de reserva anaeróbica, MLSS: máximo estado estable de lactato, MSS: velocidad máxima de sprint, RST: entrenamiento de sprints repetidos, SIT: entrenamiento intervalado de sprints, VO_{2max} : consumo máximo de oxígeno, vVO_{2max} : mínima velocidad de carrera requerida para

2.2. Acercamiento a los deportes de equipo:

Debido a los requerimientos técnico-tácticos de los deportes de equipo, y siguiendo el importante principio de especificidad de entrenamiento, juego (i.e. también llamado juegos reducidos, SSG) (43-46) o basados en las habilidades (47, 48) condicionales ha recibido un interés que ha crecido a nivel exponencial (49). Mientras entendemos que la respuesta del VO_{2max} en los SSG es limitada (44, 50, 51), $T@VO_{2max}$ durante un SSG en jugadores de balonmano de nivel nacional fue conseguido en el 70% de la sesión (i.e. 5min 30seg de 8min de juego) (50). Aunque se ha demostrado la eficiencia de este enfoque (43, 46, 52, 53), SSGs tiene limitaciones que apoyan el uso de formatos de HIT menos específicos (i.e. basados en la carrera) pero más controlados en ciertos momentos de la temporada o para necesidades específicas de algún jugador. La carga aguda fisiológica puede ser manipulada variando reglas técnicas (54), el número de jugadores y las medidas del terreno (55), pero la carga total no puede, por defecto, ser precisamente estandarizada. Las respuestas de los jugadores al SSG son muy variables (poca reproductibilidad de la concentración de lactato en sangre [coeficiente de variación (CV): 15-30%] y respuestas de correr a alta intensidad [CV: 30-50%] (56, 57)), y las respuestas cardiovasculares entre jugadores tienen una mayor variabilidad que un HIT específico basado en la carrera (49). Durante un SSG en balonmano, el VO_{2max} promedio se mostró inversamente relacionado con el VO_{2max} (50), sugiriendo un posible techo para el desarrollo del VO_{2max} en los jugadores más aptos. Además, alcanzar y mantener un alto nivel cardiaco se cree necesario para mejorar la función cardiaca máxima (58, 59). Los repetidos cambios en el patrón de movimiento y la alternancia de periodos de trabajo y descanso durante un SSG podría, por tanto, inducir variaciones en la acción de retorno venoso muscular, lo que puede, a su vez, limitar el mantenimiento de un alto volumen sistólico (SV) durante todo el ejercicio y comprometer las adaptaciones a largo plazo (60) (ver sección 3.2). Comparando con ejercicios genéricos basados en la carrera, el ratio $VO_{2max}/$ Frecuencia cardiaca (FC) (que se puede usar con precaución como un sustituto de los cambios en el SV durante un ejercicio constante cuando la diferencia arteriovenosa de O_{2max} se considera constante (61)) también es probablemente menor durante un SSG (44, 50, 51). Mientras este ratio es generalmente cercano a 1 durante intervalos largos basados en la carrera (i.e. VO_{2max} al 95% VO_{2max} para una FC al 95% o máxima (FCmax) (21, 62), los autores han mostrado valores del 79% VO_{2max} y 92% FCmax durante juegos de fútbol indoor de cinco a uno (51). Esto confirma las limitaciones mencionadas anteriormente con respecto a la implicación del SV, y sugieren que la evaluación de las respuestas cardiopulmonares durante un SSG (y juegos competitivos) usando la FC puede ser engañoso (63). Finalmente, la relación $VO_{2max}/$ velocidad (50) (y FC/velocidad (63)) también tiende a ser más alta durante un SSG comparado con genéricos de carrera, posiblemente debido a que se involucra una mayor masa muscular. Mientras que este método de entrenamiento se considera a menudo altamente específico, esto no es siempre el caso, ya que durante un partido los jugadores tienden a tener más espacio para correr y para alcanzar velocidades de carrera mayores (por encima del 85-90% de la máxima velocidad de sprint (66)) para unas demandas metabólicas probablemente similares.

2.3. Prescripción basada en la frecuencia cardiaca:

La frecuencia cardiaca ha sido el marcador fisiológico más medido para controlar la intensidad del ejercicio en el campo (67). Ajustar la intensidad del ejercicio utilizando zonas basadas en la FC es adecuado para ejercicios submáximos y prolongados; sin embargo, su efectividad para controlar o ajustar la intensidad de una sesión HIT puede ser limitada. La FC no puede informar de la intensidad del trabajo físico sobre la velocidad/potencia asociada al VO_{2max} , la cual representa una gran proporción de las prescripciones HIT (3-5). Además, aunque se espera que la FC alcance sus valores máximos (>90-95% FCmax) para un ejercicio en o por debajo de la velocidad/potencia asociada al VO_{2max} , esto no siempre ocurre, especialmente en intervalos muy cortos (<30seg) (68) y medio-largos (i.e. 1-2min) (69). Esto está relacionado con el conocido retraso de la FC al inicio del ejercicio, el cual responde mucho más lento que el VO_{2max} (70). Además, la inercia de la FC al cesar un ejercicio (i.e. recuperación FC) puede también ser problemático en este contexto, ya que esto puede crear una sobreestimación de la carga actual fisiológica/trabajo que se produce durante los periodos de recuperación (69). Esto también ha sido mostrado que diferentes sesiones de ejercicio (según lo evaluado por los niveles de la acumulación de lactato en sangre durante un HIT basado en carrera (71) y por la velocidad de carrera durante un SSG (63)) pueden tener relativamente una respuesta de la FC media similar. Así, la disociación temporal entre la FC, el VO_{2max} , los niveles de lactato en sangre y el trabajo durante el HIT limita nuestra capacidad de estimar con precisión la intensidad del HIT usando solo la FC. Además, es difícil imaginar como un deportista controlaría o ajustaría la intensidad de ejercicio durante un intervalo, especialmente en deportistas que corren a altas velocidades, dónde ver la FC en el reloj es difícil.

2.4. Prescripción basada en la percepción subjetiva del esfuerzo:

El método de prescripción de la intensidad del HIT usando la percepción subjetiva del esfuerzo (RPE) (72) es altamente

atractiva porque es simple (no necesita un monitor de FC) y versátil. Desde este acercamiento, los entrenadores generalmente prescriben variables independientes como la duración o la distancia de trabajo y el descanso de los intervalos (71). En cambio, el deportista puede autorregularse la intensidad del ejercicio. La intensidad seleccionada es normalmente la máxima intensidad percibida como sostenible (“fuerte” o “muy fuerte”, i.e. >6 en una escala de Borg sobre 10 y >15 en una escala de 6-20) y se basa en la experiencia del deportista, el objetivo de la sesión y las consideraciones externas relacionadas con la periodización del entrenamiento. Mientras que las reglas específicas (o contribuciones) desempeñadas por los aferentes biológicos y otros procesos neurocognitivos involucrados en la selección del ritmo del ejercicio basado en el esfuerzo todavía se discuten (ver punto de vista (73)). Las respuestas del RPE son independientes del sexo (78) y comparables durante un ritmo constante o libre del ejercicio (79). En la práctica, el primer beneficio de guiar las sesiones HIT por RPE (69, 71) es que no se requiere conocimiento del nivel de rendimiento del deportista (no se necesitan resultados de test). Finalmente, RPE es un “regulador” del ejercicio universal, que no depende del modo de locomoción, las variaciones del terreno y las condiciones ambientales. Mientras que son necesarios más estudios en deportistas altamente entrenados para confirmar la eficacia de guiar las sesiones de entrenamiento por RPE, ha sido mostrado que produce las mismas adaptaciones fisiológicas que guiando la sesión por la FC durante 6 semanas en mujeres jóvenes (80). El método RPE tiene limitaciones, sin embargo, ya que no permite la manipulación precisa de la respuesta fisiológica de una sesión HIT dada. Esto podría limitar la habilidad de afinar en una adaptación específica (i.e. Fig. 1), y podría también ser problemático en ajustar en deportes de equipo (analizado en las tres secciones precedentes). Hay también alguna evidencia que sugiere que la habilidad de ajustar/evaluar la intensidad del ejercicio basándose en la RPE puede depender de la edad (81), de la aptitud (82, 83), de la intensidad del ejercicio y la satisfacción (84).

2.5. Velocidad/potencia asociada al consumo máximo de oxígeno (VO_{2max}):

Siguiendo los primeros trabajos en los años 1970 y 1980 (85-88), los fisiólogos V.L. Billat y D.W. Hill popularizaron la velocidad (o potencia) asociada al VO_{2max} también llamada v/p VO_{2max} o velocidad/potencia máxima aeróbica (VAM/PAM)(89, 90)) como una referencia útil para programar la intensidad del HIT (3-5). El atractivo del v/p VO_{2max} es que representa una medida integrada del VO_{2max} y del coste energético de correr/ciclismo en un mismo factor; por lo tanto, es directamente representativo de la habilidad locomotora del deportista (89). Ya que la v/p VO_{2max} es teóricamente la menor velocidad/potencia necesaria para alcanzar el VO_{2max} , tiene sentido representar este marcador como una referencia ideal para el entrenamiento (5, 15, 89).

v/p VO_{2max} puede ser determinada, o estimada, por diferentes vías. Los métodos utilizados son los siguientes:

La relación lineal entre el VO_{2max} y la velocidad de carrera establecida a velocidades submáximas (88).

El coste energético individual de la carrera para un dado VO_{2max} , ya sea con (91) o sin (92) restar valores de VO_{2max} .

Medición directa (i.e. intercambio gaseoso (93)) durante un test incremental en rampa hasta la extenuación (carrera/ciclismo), ya sea en la pista, o en un tapiz rodante o un ergómetro. En la pista, el “University Montreal Track Test” (UM-TT (87)) es el protocolo más usado con deportistas (94, 95), aunque el Vam-Eval (96), el cual solo se diferencia del UM-TT en unos incrementos más suaves de la velocidad y una menor distancia entre conos, ha incrementado su interés por su facilidad para poblaciones jóvenes y/o corredores no especialistas en largas distancias (97, 98). Aunque el “verdadero” v/p VO_{2max} durante un test incremental requiere la medición del VO_{2max} para determinar la menor velocidad/potencia necesaria para alcanzar el VO_{2max} (generalmente definida como la meseta del VO_{2max} o un incremento menor a 2.1 ML/min/kg a pesar de aumentar la velocidad 1km/h (93)), el incremento final (pico) de velocidad/potencia alcanzado al final del test (v/pInc.Test) es solo una aproximación de la v/p VO_{2max} . Estas dos distintas velocidades/potencias son fuertemente correlacionadas ($r>0.90$ (87)), pero la v/pInc.Test puede ser un 5-10% mayor que la v/p VO_{2max} en deportistas con una mayor reserva anaeróbica que en general presentan una diferencia mayor v/p VO_{2max} - v/pInc.Test. La medición de la VInc.Test es, sin embargo, muy práctica en el campo, ya que es altamente correlacionada con el rendimiento en corredores de resistencia (99) y la capacidad de correr en los partidos de deportes de equipo (pero solo en algunas posiciones) (98, 100).

El test de 5min de carrera hasta el agotamiento (101), ya que el tiempo medio hasta la extenuación a vVO_{2max} ha sido demostrado que esta sobre el rango de 4 a 8min (89, 102). El cálculo de la vVO_{2max} mediante este test ha sido muy correlacionado con la VInc.Test alcanzada en el UM-TT ($r=0.94$) y con el test en rampa en tapiz rodante ($r=0.97$) (101), siendo ligeramente (i.e. rango de 1km/h) más lento y más rápido que estas velocidades, respectivamente. La vVO_{2max} estimada mediante el test de 5min es, sin embargo, probablemente influenciada por la estrategia de ritmo y puede que solo sea válido en corredores entrenadores que puedan correr a vVO_{2max} sobre 5min.

vVO_{2max} es también un método (90) y un protocolo-dependiente (103). Una estimación matemática de la vVO_{2max} (88, 91) es probable que sea inferior a la medición de la vVO_{2max} (93) que es también inferior que la VInc.Test (89, 104). Además, independientemente del método usado para determinar la vVO_{2max} , protocolos con estadios más largos tienen a obtener un menor valor de la velocidad/potencia (103), mientras que incrementos más grandes de velocidad/potencia produce unos

valores mayores de velocidad/potencia. De la misma forma, la vVO_{2max} también parece estar inversamente relacionada con el terreno o la curva del tapiz rodante (105). Los deportistas de resistencia entrenados suelen tolerar estadios más largos y además, suelen presentar menos diferencias en la vVO_{2max} con la variación de protocolos. Estas diferencias deben ser conocidas ya que pequeñas diferencias en la prescripción de la intensidad de trabajo tiene efectos substanciales en las respuestas agudas del HIT.

La fiabilidad de la vVO_{2max} y la VInc.Test (examinadas usando CVs) ha sido demostrada ser buena: 3% de la vVO_{2max} in corredores moderados de media y larga distancia (68), 3,5% para el UM-TT VInc.Test en deportistas moderadamente entrenados (87), 3,5% (límites de confianza del 90%: 3.0, 4.1 [Buchheit M, resultados no publicados]) para el Vam-Eval VInc.Test en 65 jugadores de fútbol muy entrenados, 2,5% y 3% para VInc.Test en tapiz rodante en corredores de resistencia hombres bien entrenados (106) y corredores recreacionales (104), respectivamente, y finalmente, 1-2% para el test de 5min en una muestra heterogénea de población deportiva (107).

Para la prescripción de entrenamiento, la determinación de la VInc.Test en el campo con el UM-TT (87) o el Vam-Eval (96), son probablemente los métodos preferidos, ya que, no necesitan aparatos sofisticados, y además solicitan la contribución anaeróbica necesaria para obtener el VO_{2max} . Esto, sin embargo, vale la pena señalar que el uso de la vVO_{2max} y la VInc.Test como referencia de la velocidad de carrera es esencialmente adecuado para intervalos largos (2-6min) corriendo sobre la vVO_{2max} (90-105%). Para intensidades de entrenamiento sub- y supramáximas, sin embargo, la importancia de otros parámetros fisiológicos deberían ser considerados. Por ejemplo, la capacidad de resistencia (o la capacidad de sostener un porcentaje dado de la vVO_{2max} en el tiempo (109)) y la capacidad/potencia anaeróbica (110) suelen influenciar el tiempo hasta el agotamiento y, por consecuencia, las respuestas fisiológicas. En las siguientes secciones analizaremos las diferentes opciones de prescribir intensidades de entrenamiento supramáximo (i.e. intensidades superiores a la vVO_{2max}).

2.6. Reserva de velocidad anaeróbica:

A menudo los entrenadores y científicos no toman en cuenta la reserva de velocidad anaeróbica individual (ASR; la diferencia entre la máxima velocidad de sprint (MSS) y la vVO_{2max} , Fig. 3) en la prescripción del entrenamiento. Mientras que los "entrenadores de pista-campo" (carrera) han usado este concepto indirectamente durante años para marcar la intensidad de trabajo del intervalo (analizado en la sección 2.1), su fundamento científico y su interés solo se dio a conocer hace apenas una década, cuando Billat y co-autores (110) mostraron como el tiempo hasta el agotamiento a intensidades sobre la vVO_{2max} se relacionó mejor con la ASR y/o la MSS, que con la vVO_{2max} . Bundle et al. (111-113) demostraron, usando una predicción empírica del modelo, que el porcentaje de la ASR utilizada podría determinar el rendimiento en esfuerzos *all-out*, desde de unos segundos hasta algunos minutos. Mientras que estos estudios han utilizado trabajos continuos, la ASR solo ha sido considerada recientemente en relación al rendimiento en sprint repetidos (114, 115). En la práctica, dos deportistas pueden presentar una clara diferencia en la MSS, mientras que pueden obtener una vVO_{2max} similar (Fig. 4 (116)). Si durante una sesión HIT ellos utilizan un porcentaje similar de la vVO_{2max} , como es generalmente utilizado en el campo (Ej.: ver (117)), el ejercicio involucrará una proporción diferente de su ASR, lo cual provocará unas demandas fisiológicas diferentes y una tolerancia diferente al ejercicio (116). Por lo tanto, parece que, además de la vVO_{2max} , la medición de la MSS (y ASR) debería de ser considerada a la hora de individualizar las intensidades de entrenamiento durante HIT supramáximo (110, 116).

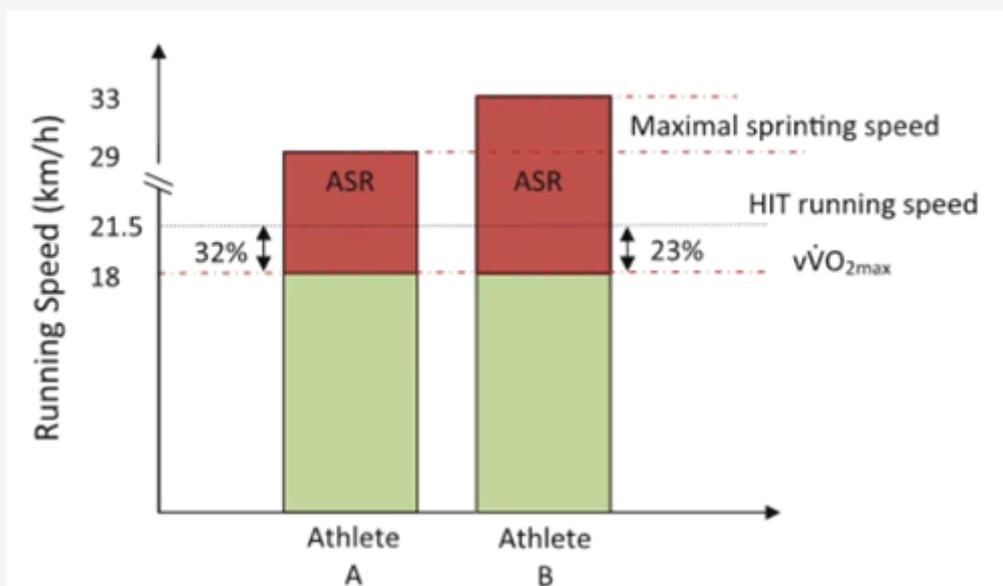


Figura 4. Ilustración de la importancia de la ASR para dos deportistas con una velocidad asociada al $v\dot{V}O_{2max}$ similar, pero con diferentes velocidades máximas de sprint. Durante una sesión HIT, el deportista B con una ASR mayor trabajará con un porcentaje menor de su ASR, y por lo tanto, alcanzará una menor carga de trabajo comparado con el deportista A (116). ASR: reserva de velocidad anaeróbica, HIT: entrenamiento intervalado de alta intensidad, $v\dot{V}O_{2max}$: mínima velocidad de carrera asociada al máximo consumo de oxígeno.

2.7. Velocidad pico en el Test Intermitente 30-15:

Mientras que la utilización de la ASR para individualizar las intensidad del entrenamiento en carreras supramáximas podría representar una alternativa mejorada a la $v\dot{V}O_{2max}$ y a la VInc.Test, todavía no captura un panorama general de las diferentes variables fisiológicas que se dan en las sesiones HIT específicas de deportes de equipo o raqueta. En muchos deportes, el HIT se realiza a cubierto e incluye intervalos repetidos muy cortos (<45seg). Esto implica que, además del porcentaje de la ASR utilizado, las respuestas de estas variables de HIT parecen relacionarse con a la individual: (1) inercia metabólica (Ej.: cinética del VO_{2max}) de cada intervalo corto; (2) capacidad de recuperación fisiológica en cada descanso del intervalo; y (3) la habilidad de cambiar de dirección (94, 116). Programar una sesión HIT sin considerar estas variables puede llevar a realizar una sesión con diferentes demandas energéticas aeróbicas y anaeróbicas, lo que impide la estandarización de la carga de entrenamiento, y limita la habilidad de incidir en una adaptación fisiológica objetivo específica (94). Para superar las limitaciones antes mencionadas inherentes a la medida de la $v\dot{V}O_{2max}$ y la ASR, se desarrolló el Test Intermitente 30-15 (30-15IFT) para la prescripción de HIT en deportes intermitentes y con cambios de dirección (COD) (35, 94, 116). El 30-15IFT fue diseñado para obtener una FC y VO_{2max} máximos, pero también para proporcionar medidas de la ASR, la habilidad de repetir esfuerzos, la aceleración, la desaceleración y las habilidades COD (94, 118, 119). La velocidad final alcanzada durante el 30-15IFT, VIFT, es por lo tanto un producto de las habilidades antes mencionadas. En otras palabras, el 30-15IFT, es altamente específico, no para un deporte específico, si no para las sesiones de entrenamiento comunes a un deporte intermitente (116). Mientras que las velocidades pico alcanzadas en los diferentes Yo-Yo test (120) (Ej.: $vYo\text{-}YoIR1$ para el Yo-Yo Recuperación Intermitente Nivel 1) y la VIFT suelen tener requerimientos fisiológicos similares (121), solo la VIFT puede utilizarse con precisión para la prescripción de entrenamiento. Por ejemplo, la $vYo\text{-}YoIR1$ no puede ser directamente utilizada para la prescripción de entrenamiento, ya que, en contraste con la VIFT (35), su relación con la VInc.Test (y la $v\dot{V}O_{2max}$) es dependiente de la velocidad (121) (Fig. 5). Cuando se corre a $vYo\text{-}YoIR1$, los deportistas lentos y poco entrenados usan un mayor porcentaje de su ASR, mientras que los deportistas más entrenados corren por debajo de su $v\dot{V}O_{2max}$ (Fig. 5). Finalmente, la VIFT ha sido mostrada ser más adecuada que la VInc.Test para individualizar el entrenamiento HIT con COD en deportistas bien entrenados de deportes de equipo (94), y esta fiabilidad es buena, con el error típico de medición (expresado en CV) muestra un 1,6% (95% CL 1.4, 1.8) (122). También es digno de mención, ya que la VIFT es 2-5km/h (15-25%) más rápida que la $v\dot{V}O_{2max}$ y/o la VInc.Test (35, 116, 119), es necesario "ajustar" el porcentaje de la VIFT usado cuando programamos. Mientras que el HIT se realiza generalmente sobre la $v\dot{V}O_{2max}$ (i.e. 100-120% (3, 4), Fig. 3), la VIFT constituye el límite superior de ese ejercicio (excepto para intervalos muy cortos y sprints repetidos *all-out*). Así, el 30-15IFT permite una mejor precisión de la programación individualizando la intensidad de los intervalos prescritos sobre intensidades que rondan entre el 85% y el 105% de la VIFT (43, 50, 123-125).

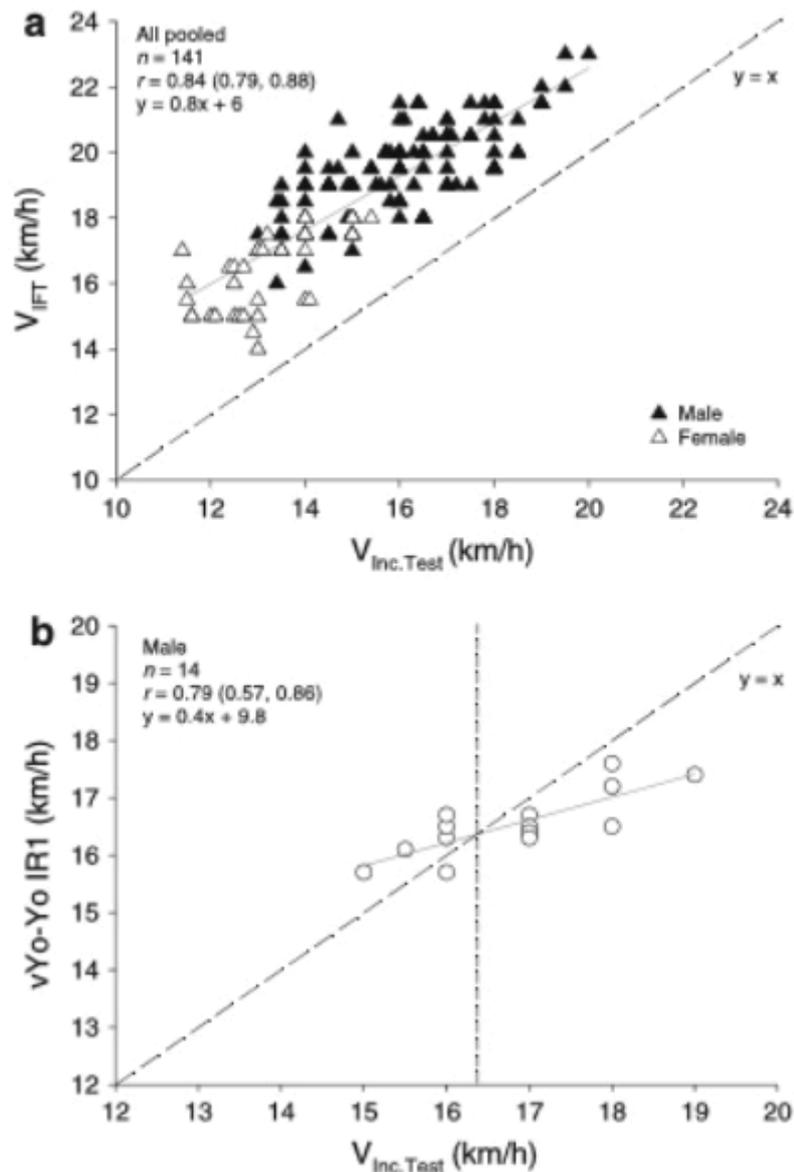


Figura 5. Relaciones (90% límites de confianza) entre la VIFT, panel superior (Buchheit M, datos personales (35), la vYo-YoIR1, panel inferior (121) y la VInc.Test. VIFT: velocidad alcanzada al final del Test Intermitente 30-15, VInc.Test: velocidad pico en un test incremental, vYo-YoIR1: velocidad pico de carrera alcanzada al final de un Test Intermitente Yo-Yo de recuperación Nivel 1.

2.8. Entrenamientos de sprint all-out:

En los últimos años ha crecido el interés en la investigación sobre los esfuerzos de sprint all-out repetidos (9, 126). En términos prácticos, estas sesiones pueden ser divididas según la duración de los sprints en cortas (3-10seg, RST) o largas (sprints de 30-45seg, SIT). Ye que este ejercicio se realiza de manera consistente a intensidad “all-out”, pueden ser prescritos sin la realización de un pre-test individual (i.e. no es necesaria la v/pVO_{2max} para calibrar la intensidad).

3. Respuestas agudas de las variantes del entrenamiento intervalado:

3.1. Maximizando el tiempo expuesto a o cercano a VO_{2max} :

Iniciamos esta revisión con datos relacionados con el $T@VO_{2max}$ (revisar lo anterior (14)), ya que las respuestas del VO_{2max} pulmonar pueden integrar tanto las respuestas cardiovasculares como en metabolismo muscular (oxidativo) de las sesiones HIT. En esta revisión, integraremos las investigaciones recientes y proporcionaremos un análisis exhaustivo de las respuestas del VO_{2max} de las diferentes variantes de HIT, desde los intervalos largos hasta el SIT, mediante intervalos cortos o recuencias de sprints repetidos (RSS, Fig. 3). La Figura 6 ilustra las respuestas del VO_{2max} de cuatro sesiones

diferentes de HIT, incluyendo intervalos largos, y destacando cómo los cambios en las variables HIT pueden influenciar en el $T@VO_{2max}$ (21, 50, 127, 128). Existen, sin embargo, numerosas limitaciones metodológicas que necesitan ser consideradas a la hora de interpretar los resultados de los diferentes estudios (68, 203, 129). Además de las limitaciones metodológicas entre estudios (tapiz rodante vs correr en exterior, criterio de determinación del VO_{2max} y vVO_{2max} , análisis de los datos (media, técnicas de suavizado), consideración de umbrales de mínimos valores de VO_{2max} considerados como máximos (90%, 95%, VO_{2max} incremento menor a 2.1. ml/min/kg, 100%)), diferencias en el nivel de fiabilidad de los analizadores y la variación en el VO_{2max} intra-día del sujeto, cinética del VO_{2max} y tiempo hasta el agotamiento, pueden dificultar la comparación entre estudios. Los efectos de la manipulación de las variables del HIT en el $T@VO_{2max}$ observados dentro de los estudios, pueden, sin embargo, proporcionar una visión que haga entender cómo sería la mejor manera de manipular las variables HIT.

3.1.1. Respuestas en el consumo de oxígeno (VO_{2max}) en intervalos largos:

3.1.1.1. Intensidad durante los intervalos largos:

Durante un solo ejercicio a velocidad o potencia constante, se necesita una intensidad cercana a la v/pVO_{2max} para obtener la máxima respuesta del VO_{2max} . En un intento de determinar la velocidad asociada con el mayor $T@VO_{2max}$ corriendo hasta la extenuación, seis estudiantes de educación física realizaron cuatro ejercicios separados de carrera a las siguientes intensidades: 90%, 100%, 120% y 140% de su VO_{2max} (17km/h) (130). No es sorprendente que el tiempo hasta la extenuación fue inversamente relacionado a la intensidad de carrera. El $T@VO_{2max}$ durante las condiciones de 90% y 140% fue insignificante (i.e. <20seg de media), pero consiguió sustancialmente “mayores” valores al 100 y al 120%: media +desviación estándar 190 +- 87 (57% del tiempo hasta la extenuación, ES > +2.8) y 73 +- 29seg (59%, ES > 1.7). La habilidad de alcanzar el VO_{2max} durante una sola carrera a velocidad entre el máximo estado estable de lactato y la vVO_{2max} (i.e. $v\Delta 50$, =92-93% de la vVO_{2max} (130)) mediante el desarrollo del componente lento del VO_{2max} (10) es probablemente dependiente del nivel físico del deportista (132) (con deportistas altamente entrenados es poco probable alcanzar el VO_{2max}). Además, como la determinación de la $v\Delta 50$ es poco práctica en el campo, trabajar a intensidades igual o superiores al 95% de la v/pVO_{2max} es recomendable para maximizar el $T@VO_{2max}$ durante carreras aisladas. Sin embargo, en la práctica, los deportistas no realizan el ejercicio hasta la extenuación, si no que usan intervalos o repeticiones. Intensidades ligeramente inferiores (mayor o igual al 90% de la v/pVO_{2max}) pueden también utilizarse realizando periodos repetidos de ejercicio (como durante las sesiones HIT), ya que el VO_{2max} de cada intervalo es probable que aumente con las repeticiones con el desarrollo del componente lento del VO_{2max} (10). Como sugirió Astrand en los años 1960 (10), no se necesitan intensidades máximas durante el HIT para alcanzar el VO_{2max} .

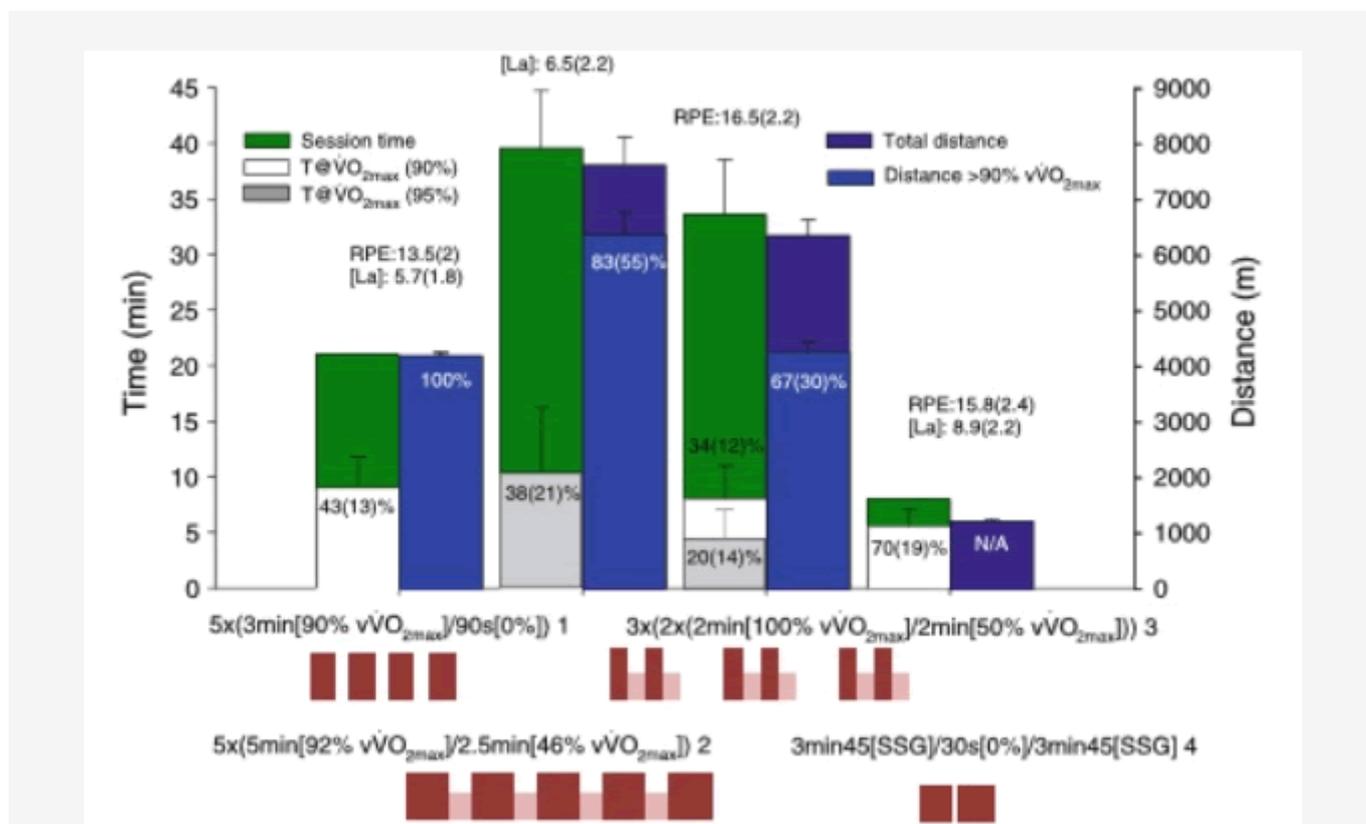


Figura 6. La media \pm SD del tiempo total de la sesión, el $T@VO_{2max}$, la distancia total y la distancia corrida sobre el 90% de la vVO_{2max} durante cuatro sesiones de HIT diferentes, incluyendo intervalos largos. Los porcentajes (media \pm SD) se refieren al $T@VO_{2max}$ relativo al tiempo total de la sesión, y la distancia corrida sobre el 90% de la vVO_{2max} relativo a la distancia total corrida. La RPE y la [La] (mmol/L) están provistos como media \pm SD cuando esté disponible. Referencias: 1 (21), 2 (127), 3 (128) y 4 (50). HIT: entrenamiento intermitente de alta intensidad, [La] concentración de lactato en sangre, N/A: no disponible, RPE: ratio de percepción del esfuerzo, SSG: juegos reducidos (Balonmano), VO_{2max} : consumo máximo de oxígeno, $T@VO_{2max}$: tiempo mantenido sobre el 90% o el 95% del VO_{2max} , vVO_{2max} : mínima velocidad de carrera asociada al VO_{2max} .

3.1.1.2. Tiempo hasta alcanzar el VO_{2max} y maximizar la duración de intervalos largos:

Si el VO_{2max} es alcanzado en la primera repetición de la secuencia, la duración del intervalo debe ser, al menos, igual al tiempo necesario para alcanzar el VO_{2max} . Así, con intervalos cortos, como una sesión típica de HIT (duración de trabajo < tiempo necesario para alcanzar el VO_{2max}), normalmente no se alcanza el VO_{2max} en el primer intervalo. Los valores del VO_{2max} pueden, sin embargo, alcanzarse durante los intervalos consecutivos, mediante el efecto cebador de un calentamiento adecuado y/o los primeros intervalos (que aceleran la cinética del VO_{2max} (133, 134)) y el desarrollo del componente lento del VO_{2max} (10). El tiempo necesario para alcanzar el VO_{2max} durante un ejercicio a velocidad constante hasta la extenuación ha estado en debate en el pasado (104, 131, 135-138). La variable ha sido mostrada en un rango desde los 97seg (138) hasta los 299seg (131) y ha tenido una gran variabilidad inter-sujeto (del 20-30% (131, 135, 137) hasta el 40% (104)). Mientras que las diferencias metodológicas podrían explicar estas diferencias (si se considera el 95% o el 100% del VO_{2max} , la presencia o el tipo de calentamiento previo al test), la variabilidad es consistente con lo mostrado en la cinética del VO_{2max} en el inicio del ejercicio. La cinética del VO_{2max} es generalmente afectada por la intensidad del ejercicio (139), más acelerada en carrera que en ciclismo (140) y más rápida en deportistas entrenados (141). La relación entre la cinética del VO_{2max} al inicio del ejercicio y el VO_{2max} , sin embargo, está menos claro, con algunos estudios que muestran correlaciones (141-143) y otros que no la muestran (144-146), sugiriendo que la cinética del VO_{2max} al inicio del ejercicio se relaciona más con el nivel de entrenamiento (141, 147) que con el VO_{2max} .

Como una alternativa para determinar una duración fija de los intervalos largos, la comunidad científica sugirió utilizar el 50-70% del tiempo hasta la extenuación a vVO_{2max} para individualizar el entrenamiento intervalado (3, 5, 137, 148-150). Sin embargo, desde nuestro conocimiento, prescribir el entrenamiento en base al tiempo hasta la extenuación es muy extraño comparado con como entrenan actualmente los deportistas. Además, mientras que la lógica de este enfoque es sólida (50-70% es la proporción media del tiempo hasta la extenuación necesario para alcanzar el VO_{2max}), no es un método práctico para aplicar en la pista. Primero, porque además de la vVO_{2max} , el tiempo hasta la extenuación a vVO_{2max} también debe ser determinado, mientras que solo es una medida moderadamente fiable (CV=12% (68) a 25% (93)), es exhaustiva por naturaleza y altamente dependiente de la exactitud con la que determinemos la vVO_{2max} (103). Segundo, porque el tiempo necesario para alcanzar el VO_{2max} ha sido frecuentemente determinado con una duración mayor al 75% del tiempo hasta la extenuación en algunos participantes (131, 135, 136). Realizar intervalos hasta el 70% del tiempo hasta la extenuación también ha sido mostrado que es muy difícil de realizar, ya que requiere una alta contribución de energía anaeróbica (150). Realizar repeticiones con una duración del 60% del tiempo hasta la extenuación en deportistas con excepcionales tiempos hasta la extenuación no es alcanzable (137). Finalmente, no hay relación entre el tiempo necesario hasta alcanzar el VO_{2max} y el tiempo hasta la extenuación (135, 137). Por lo tanto, como un porcentaje dado de tiempo da como resultado cantidades muy diferentes de $T@VO_{2max}$, parece lógico usar el tiempo necesario para alcanzar el VO_{2max} como método para individualizar la duración de los intervalos (135) (Ej.: el tiempo necesario para alcanzar el VO_{2max} + 1 o 2 min). Si el tiempo necesario para alcanzar el VO_{2max} no puede ser determinado (como es a menudo en el campo), nosotros recomendaríamos utilizar intervalos con una duración fija superior o igual a 2-3min que podría ser ajustado de acuerdo al nivel del deportista (con atletas poco entrenados utilizar cargas más bajas pero intervalos más largos) y el tipo de ejercicio. De hecho, si consideramos que la constante de tiempo en la primera fase de la cinética del VO_{2max} del inicio del ejercicio (τ) a intensidad severa está en el rango de 20 a 35seg (131, 140, 146), y que el estado estable (mayor o igual al 95% del VO_{2max}) es alcanzado después del inicio del ejercicio sobre 4τ , el VO_{2max} debería entonces ser alcanzado desde 1min 20seg hasta 2min 20seg (al menos cuando los intervalos son repetidos), independientemente del nivel de deportista y el tipo de ejercicio. Esto está relacionado con los datos mostrados en Vuorimaa et al. (2000) en corredores de nivel nacional (vVO_{2max} = media \pm SD 19,1 \pm 1km/h), donde los valores del VO_{2max} se consiguieron durante intervalos de 2min de trabajo y 2 min de pausa, pero no con intervalos de 1min/1min. Igualmente, en el estudio de Seiler y Sjursen (2004) con corredores bien entrenados (vVO_{2max} = 19,7 \pm 1km/h), el pico del VO_{2max} fue de solo un 82 \pm 5% del VO_{2max} con intervalos de 1min, mientras que fue de un 92 \pm 4% con intervalos de 2min; mientras que intervalos más largos no modificaron estos valores pico (93 \pm 5 y 92 \pm 3% para intervalos de 4 y 6min respectivamente). Aunque se realizaron en un tapiz rodante con inclinación (5%), estas últimas sesiones se realizaron a velocidades submáximas auto-seleccionadas (i.e. 91, 83, 76 y 70% de la vVO_{2max} para los intervalos de 1, 2, 4 y 6min, respectivamente (71)), lo cual, probablemente explica porque no se alcanzó el VO_{2max} (130) (ver sección 3.1.1.4 respecto a correr en cuestas).

3.1.1.3. Características de los intervalos de descanso durante intervalos largos de entrenamiento intervalado de alta intensidad:

Cuando programamos HIT, tanto la duración como la intensidad del descanso son importantes (152). Estas dos variables deben tenerse en cuenta para (1) maximizar la capacidad de trabajo en los siguientes intervalos (Incrementando el flujo sanguíneo para acelerar la recuperación metabólica, ej.: resíntesis de la PCr, amortiguación de los iones H⁺, regular la concentración del fosfato inorgánico (Pi) y el transporte de K⁺, la oxidación del lactato muscular) y; (2) mantener un mínimo nivel de VO_{2max} para reducir el tiempo necesario para alcanzar el VO_{2max} en el siguiente intervalo de trabajo (i.e. empezar con una línea base elevada) (3, 14). Mientras que realizar una recuperación activa entre los intervalos es atractivo para disminuir el tiempo necesario para alcanzar el VO_{2max} y, de hecho, induce una mayor contribución del metabolismo aeróbico de la energía total (134), esto afecta a la capacidad de rendimiento (tiempo hasta la extenuación), y, en consecuencia, el T@VO_{2max} no está claro. Los beneficios de una recuperación activa han sido evaluados a menudo a través de los cambios en la concentración de lactato en sangre (153, 154), lo cual tiene poco que ver con la concentración de lactato muscular (155). Además, ni el lactato en sangre (156, 157) ni en el músculo (155) tienen una relación directa (no lineal) con la capacidad de rendimiento. Los conocimientos actuales son que la recuperación activa puede disminuir la oxigenación muscular (158, 159), dificultar la resíntesis de la PCr y activar el sistema anaeróbico durante el siguiente esfuerzo (160). Además, mientras que un efecto beneficioso en el rendimiento de los siguientes intervalos puede ser esperado con largos periodos de recuperación (mayor o igual a 3min (134, 161, 162), cuando el posible efecto “lavado” supera el de la probable reducción de la resíntesis de PCr), el uso de la recuperación activa también puede tener efectos negativos en los siguientes intervalos realizando estos periodos a alta intensidad (>45% v/p VO_{2max}) (153) y periodos cortos variando la intensidad (159, 163). En el contexto del HIT con intervalos largos, la recuperación pasiva se recomienda cuando la duración de los descansos es inferior a 2-3min. Si se elige la utilización de recuperación activa por alguna de las anteriores razones mencionadas (i.e. 3, 14, 134), los intervalos de recuperación deberían ser de al menos 3-4 min a una intensidad submáxima (153) que permita mantener una intensidad alta durante los siguientes intervalos.

En la práctica, realizar una recuperación activa es difícil de aplicar a la mayoría de deportistas, especialmente a deportistas no entrenados. Cuando se pregunta a corredores moderadamente entrenados (vVO_{2max} = 17,6 km/h) que autoseleccionen su recuperación durante una sesión HIT (6x4min corriendo al 85% de la vVO_{2max} en tapiz rodante con una inclinación del 5%), ellos eligen recuperar andando sobre 2min (69). Comparando con los intervalos de recuperación de 1min, los 2min de recuperación permiten a los corredores mantener velocidades más altas; extender las recuperaciones a los 4min no produce beneficios en cuanto a las velocidades a las que corren. El estudio de Millet et al. (2003) muestra un ratio menor de T@VO_{2max}/total (34% cuando consideramos un tiempo >90% del VO_{2max}; Fig. 6) en triatletas bien entrenados (vVO_{2max} = 19,9 ± 0,9 km/h) que probablemente estaba relacionado con la introducción de una recuperación pasiva de 5min cada dos intervalos. En cambio, Demarie et al. (2000) con intervalos realizados sucesivamente (sin pausas pasivas, ni bloques, pero con recuperaciones activas <50% de la vVO_{2max} entre intervalos) muestran mayores T@VO_{2max} en corredores de larga distancia senior (vVO_{2max} = 16,6 ± 1,1 km/h). Mas recientemente, el estudio de Buchheit et al. (2012) muestra, en corredores jóvenes altamente entrenados (vVO_{2max} = 18,6 ± 0,3), incluso periodos de recuperación más cortos (i.e. 90 seg), a pesar de una recuperación pasiva (andando), permitía a los deportistas estar una proporción relativamente alta de la sesión >90% del VO_{2max} (43%). Esta particular alta “eficiencia” también estaba probablemente relacionado con la juventud (222) y el nivel de entrenamiento (141) de los corredores (ambas se relacionan con aceleradas cinéticas del VO_{2max}).

Finalmente, en un intento de individualizar la duración de las recuperaciones entre intervalos corriendo, el volver a un valor de FC fijado o a un porcentaje de la FCmax ha sido utilizado alguna vez en el campo y en la literatura científica (165, 166). Los conocimientos actuales sobre los determinantes de la recuperación en base a la FC sugeridos, sin embargo, muestran que esta práctica no es muy relevante (69). Durante la recuperación, la FC no está relacionada con la demanda sistémica de O_{2max} ni con la pérdida de energía muscular (142, 167), pero sí con la magnitud del comando central y de los estímulos metaboreflejos (168).

3.1.1.4. Correr en subida durante intervalos largos de HIT:

A pesar de su práctica común (169), las respuestas cardiorespiratorias en sesiones de HIT en subidas o en escaleras han recibido poca atención. Estudios de laboratorio con corredores entrenados (VInc.Tes mayor o igual a 20 km/h) (170, 171) han mostrado que: para una velocidad dada, el VO_{2max} es mayor durante una subida comparando con correr en llano después de un par de minutos, probablemente debido a la mayor fuerza necesaria para moverse en contra de la gravedad, el consecuente mayor reclutamiento de unidades motoras y la mayor dependencia de contracciones concéntricas; todos los cuales se creen que son iniciadores del componente lento del VO_{2max} (172). Sin embargo, en la práctica, los deportistas corren más lento en subidas que en la pista (173). En el estudio de Gajer et al. (2003) encuentran en corredores de media distancia de élite franceses (vVO_{2max} = media ± SD 21,2 ± 0,6 km/h, VO_{2max} = 78 ± 4 ml/min/kg) que el T@VO_{2max} observado durante una sesión de HIT en subidas (6x500m [1min 40 seg] con 4-5% de pendiente al 85% de la vVO_{2max} / 1min 40seg pasivo) fue menor comparado una sesión “referencia” en pista (6x600m [1min 40seg] al 102% de la vVO_{2max} / 1min 40seg

pasivo). Mientras que el VO_{2max} alcanzado durante ambas sesiones fue del 99% del VO_{2max} para la sesión en cuesta y del 105% para la sesión en la pista, el ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo de ejercicio fue moderadamente menor durante el HIT en cuestas (27% vs 44%, $ES = -1,0$). El motivo de este menor $T@VO_{2max}$ durante la sesión de HIT en cuesta no está claro. A pesar del esperado mayor requerimiento de fuerza al correr en cuestas (173), es suficientemente improbable compensar por la reducción de la velocidad absoluta de carrera. Si nosotros consideramos que correr en subida al 85% de la vVO_{2max} con una pendiente del 5% tiene probablemente el mismo (teórico) requerimiento de energía que correr en llano (o en un tapiz rodante con una pendiente del 1% para compensar la resistencia del aire (105)) sobre el 105% (175); las diferencias observadas por Gajer et al. (2003) podrían haber sido aún mayores si la condición llana se hubiera ejecutado a un ritmo más rápido (y posiblemente mejor) (105% vs 102% (174)). Así como, los intervalos en estas sesiones podrían no haber sido lo suficientemente largos para observar el adicional componente lento por lo general atestiguado corriendo hacia arriba (sobre 2min (172)). Son necesarias, sin embargo, más investigaciones para clarificar las respuestas cardiorrespiratorias de correr con grandes pendientes (>10%) o subir escaleras que podrían requerir mayores valores de VO_{2max} debido a la participación de las extremidades superiores (los músculos de la espalda y cuando los brazos empujan hacia abajo o agarran bastones).

3.1.1.5. Volumen de HIT con intervalos largos:

Otra variable que puede ser utilizada para maximizar el $T@VO_{2max}$ es el número de repeticiones de intervalos largos. Vale la pena señalar, sin embargo, que muy pocos autores han examinado las sesiones/programas de HIT que los deportistas realizan actualmente, y que la investigación sobre el óptimo $T@VO_{2max}$ por sesión es limitada. Acumular tiempo de ejercicio a una intensidad alta (>90% v/pVO_{2max}) durante sesiones típicas en deportistas bien entrenados ha sido mostrado con 12min (6 x 2min o 6 x 600m (128)), 15min (5 x 3min o 5 x 800-1000m (21)), 16min (4 x 4min o 4 x 1000-1250m (46)), 24min (6 x 4min o 6 x 1000-1250m (69); 4 x 6min o 4 x 1500m (71)) y 30min (6 x 5min o 5 x 1300-1700m (127)), lo cuál permitió acumular a los deportistas dependiendo del formato de HIT, de 10min >90% (21, 128) a 4-10min >95% (127, 128) del VO_{2max} . Evidencias anecdóticas sugieren que los deportistas de élite tienden a acumular mayor $T@VO_{2max}$ por sesión en algunos momentos de la temporada. En ciclistas recreacionales (VO_{2max} sobre 52ml/min/kg), Seiler et al. () muestran que volúmenes altos de HIT realizados a una intensidad menor (i.e. 4 x 8min = 32 min al 90% de la FC_{max}) puede ser más efectivo que las sesiones de HIT tradicionales (Ej.: 4 x 4min). Sin embargo, se necesitan más investigaciones que examinen la influencia de estas sesiones en particular para confirmar estos resultados.

3.1.2. Respuesta del VO_{2max} a HIT con intervalos cortos:

En intervalos HIT cortos de carrera hasta la extenuación, el $T@VO_{2max}$ está muy correlacionado con el tiempo total del ejercicio (i.e. tiempo hasta la extenuación) (14). Por lo tanto, la primera aproximación para maximizar el $T@VO_{2max}$ durante estas sesiones debería ser focalizar en el ajuste de los intervalos trabajo/descanso más efectivos (intensidad y duración) para incrementar el tiempo hasta la extenuación. En la práctica, sin embargo, los entrenadores no prescriben sesiones de HIT hasta la extenuación; ellos prescriben series o bloques de HIT (50, 128, 177, 178). En este contexto, es importante considerarlas estrategias necesarias para maximizar el $T@VO_{2max}$ dentro de un periodo de tiempo dado, o definir el "tiempo eficiente" de los formatos HIT respecto al ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo de ejercicio (i.e. el $T@VO_{2max}$ en relación a la duración total de la sesión HIT, sin incluir el calentamiento).

3.1.2.1. Efecto de la intensidad del intervalo de trabajo en el $T@VO_{2max}$:

Billat et al. (2001) fueron los primeros en mostrar el efecto de la intensidad del ejercicio en el $T@VO_{2max}$ durante HIT con intervalos cortos (15seg/15seg) en un grupo de corredores de fondo ($vVO_{2max} = 15,9 \pm 1,8$ km/h) senior (edad media = 52 años). Mientras que la manipulación concurrente de la intensidad del intervalo de recuperación (60-80% de la vVO_{2max} para mantener una media de intensidad del HIT del 85%) podría haber influido parcialmente en las respuestas del VO_{2max} , los autores mostraron que incrementando la intensidad del intervalo de trabajo del 90% al 100% de la vVO_{2max} hubo una "pequeña" mejora en el ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo de ejercicio (85%) que no fue sustancialmente superior utilizando una intensidad de trabajo del 110% comparada con el 100% de la vVO_{2max} ($ES = +0,2$). Utilizando una intensidad fija del intervalo de recuperación (Fig. 7a, (117, 177, 179)), incrementando la intensidad de trabajo del 100% al 110% de la vVO_{2max} durante un formato de HIT 30seg/30seg en corredores jóvenes entrenados ($vVO_{2max} = 17,7 \pm 0,9$ km/h) induce a un "moderado" incremento en el ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo de ejercicio ($ES = +0,6$), a pesar de una reducción "muy grande" y "moderada" en el tiempo hasta la extenuación ($ES = -4,4$) y el $T@VO_{2max}$ ($ES = -0,7$), respectivamente (179). Un ligero aumento de la intensidad de trabajo del 100% al 105% de la vVO_{2max} durante un formato HIT de 30seg/30seg en triatletas bien entrenados ($vVO_{2max} = 19,8 \pm 0,93$ km/h) fue asociado con una "gran" mejora del ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo de ejercicio ($ES = +1,2$) (177). El doble de la magnitud de la diferencia en el estudio de Millet et al. (2003) comparado con el estudio de Thevenet et al. (2007) ($ES = +1,2$ vs $+0,6$) es probablemente debido al hecho de que el estudio de Millet et al. (2003) no se realizó hasta la extenuación, pero se realizaron series predeterminadas. Por lo tanto, es posible que si las carreras al 100% han sido realizadas hasta la extenuación (177), esto habría compensado la menor eficiencia del protocolo y

disminuiría la diferencia observada en el $T@VO_{2max}$. Igualmente, incrementando la intensidad de trabajo del 110% al 120% de la vVO_{2max} durante un formato de 15seg/15seg en estudiantes de educación física ($vVO_{2max} = 16,7 \pm 1,3$ km/h) permite una “mayor” mejora en el ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo ejercicio (ES = +1,8) (117). Relacionado con esto, en el estudio de Millet et al. (2003) podemos observar, con el incremento de la intensidad de trabajo, mejoras individuales en el $T@VO_{2max}$ inversamente relacionadas con el tiempo constante primario de la cinética del VO_{2max} al inicio del ejercicio ($r = 0,91$; 90% CI 0,61, 0,98), sugiriendo que el tiempo constante podría ser una variable importante a considerar cuando seleccionamos variables del HIT (116, 177). Hablando prácticamente, estos datos implican que los entrenadores deberían programar HIT a una intensidad ligeramente mayor en deportistas con una cinética del VO_{2max} lenta (i.e. mayores/poco entrenados (141)), o en deportistas que se ejercitan en bicicleta (140). Sin embargo, ya que el incremento de la intensidad del ejercicio tiene otras implicaciones (Ej.: mayor contribución anaeróbica, mayor carga neuromuscular, ver Parte II), esta manipulación de la programación necesitaría analizar el coste/beneficio.

Con respecto al uso de intensidad de ejercicio muy altas (>102/120% VIFT/ vVO_{2max}) en HIT, mientras el ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo de ejercicio es alto (81% y 77% al 130% y 140% de la vVO_{2max} , respectivamente), la capacidad del ejercicio es típicamente deteriorada y, por lo tanto, el $T@VO_{2max}$ total para unas series HIT dadas es normalmente menor (117) (i.e. 5min47seg al 120% vVO_{2max} (117)). Sin embargo, el uso de series repetidas de este tipo de entrenamiento puede permitir la acumulación de suficiente $T@VO_{2max}$. Además, deportistas bien entrenados generalmente pueden realizar HIT a estas intensidades durante más tiempo (i.e. >8min (43, 50, 95, 180), especialmente cuando la VITF, en lugar de la vVO_{2max} , es utilizada (94)). Para concluir, parece que durante HIT con intervalos cortos de trabajo, la selección de la intensidad entre el 100% y el 120% de la vVO_{2max} (>89% y 105% de la VITF) puede ser la óptima.

3.1.2.2. Efecto de la duración del intervalo de trabajo en el $T@VO_{2max}$:

El efecto de la duración del intervalo de trabajo en la respuesta sistémica del VO_{2max} durante el HIT involucrando intervalos cortos repetidos fue uno de los primeros parámetros en examinarse en la literatura del HIT (11, 12). Sorprendentemente, hay pocos datos disponibles en esfuerzos repetidos menores de 15seg, a pesar del acercamiento común de los entrenadores (Ej.: 10seg/10seg, 10seg/20seg) (181, 182). Durante carreras muy cortas (<10seg), los requerimientos de ATP en el trabajo muscular son llevados a cabo predominantemente por la fosforilación oxidativa, con más del 50% del O_{2max} utilizado derivado de las reservas de oximioglobina (11). Durante los periodos de recuperación, las reservas de oximioglobina son rápidamente restablecidas, por lo que están preparadas para el siguiente intervalo (11). Como resultado, las respuestas cardiopulmonares a este tipo de esfuerzos son relativamente bajas (183), a menos que la intensidad de la serie sea de un nivel muy alto (como se detalla en la Sección 3.1.4.) y/o los intervalos de descanso sean cortos/intensos, por lo que limiten la restauración completa de mioglobina. Además, en el contexto del HIT con intervalos cortos (100-120% de la vVO_{2max} o 89/105% de la VIFT), son necesarios intervalos igual o mayores a 10seg para aumentar la respuesta del VO_{2max} . Sorprendentemente, el efecto específico de la duración del intervalo de trabajo, usando un ratio trabajo/recuperación fijo para el mismo grupo de sujetos, no se ha investigado hasta el momento; por ejemplo, si un HIT 15seg/15seg permite un mayor ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo de ejercicio que un 30seg/30seg se desconoce.

Lo que sí que es conocido, por supuesto, es que prolongar la duración del ejercicio incrementa el requerimiento relativo de energía aeróbica (184). Incrementar la duración del intervalo de trabajo, mientras mantenemos los intervalos de recuperación constantes, también incrementa el $T@VO_{2max}$ (Fig. 7b, (128, 185, 186)). Por ejemplo, extender la duración del intervalo de trabajo de 30seg a 60seg utilizando una misma recuperación de 30seg en triatletas bien entrenados ($vVO_{2max} = 19,9 \pm 0,9$ km/h) induce mayores incrementos en el $T@VO_{2max}$ (9 vs 1,5min, ES = +2,4), a pesar de tener un tiempo total de la sesión menos (28 vs 34min, ES = -0,9; cambiando el ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo de ejercicio, ES = +2,8) (128). Igualmente, en luchadores ($vVO_{2max} = 16,3 \pm 1,1$ km/h), incrementar el intervalo de trabajo de 15seg a 30seg permite un incremento mayor del ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo del ejercicio (4 vs 0min, ES = 2,9); (185) un aumento adicional de la duración del intervalo a 60seg extendiendo el $T@VO_{2max}$ a 5,5min (ES = 0,5 vs la condición 30seg). Considerando la importancia de la cinética del VO_{2max} en el aumento del $T@VO_{2max}$ (177), estos datos sugieren que intervalos de una duración mayor (Ej.: 30seg/30seg vs 15seg/15seg) son preferibles para sujetos con una cinética del VO_{2max} lenta (i.e. mayores/poco entrenados (141)), o si se realizan en bicicleta (140).

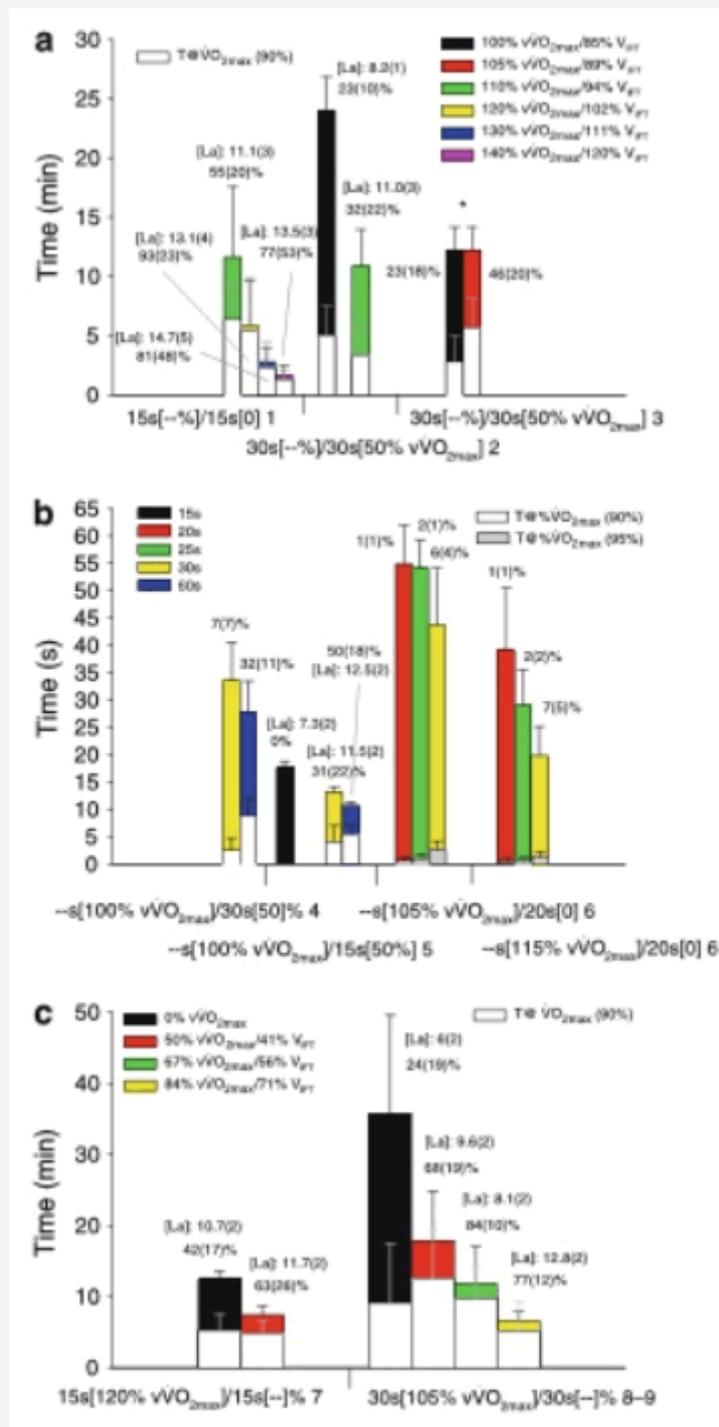


Figura 7. La media \pm SD del tiempo total y el $T@VO_{2max}$ durante diferentes modelos de HIT, incluyendo intervalos cortos, en función de los cambios en la intensidad del intervalo de trabajo (**a**: referencias: 1 (117); 2 (179) y 3 (177), de la duración del intervalo de trabajo (**b**: referencias: 4 (128); 5 (185) y (186) y de la intensidad del intervalo de recuperación (**c**: referencias: 7 (190); 8 (188) y (164). -- indica la variable que fue manipulada. Los porcentajes se refieren a la media \pm SD del $T@VO_{2max}$ en relación al tiempo total de la sesión. La media \pm SD de la [La] mmol/L se proporciona cuando está disponible (los valores del estudio 6 (186) fueron todos < 6 mmol/L y por lo tanto no provistos). HIT: entrenamiento intervalado de alta intensidad, VO_{2max} : consumo máximo de oxígeno, $T@VO_{2max}$: tiempo mantenido sobre el 90% o el 95% del VO_{2max} , VIFT: velocidad de carrera alcanzada al final de un Test Intermitente 30-15, vVO_{2max} : mínima velocidad de carrera asociada al VO_{2max} * indica que el HIT no se realizó hasta la extenuación.

3.1.2.3. Características del intervalo de recuperación y el $T@VO_{2max}$:

La intensidad del intervalo de trabajo también juega un importante rol en la respuesta del VO_{2max} durante el HIT con

intervalos cortos, ya que afecta tanto al VO_{2max} actual durante las repeticiones, como a la capacidad del ejercicio (y por lo tanto, al tiempo hasta la extenuación y al $T@VO_{2max}$; Fig. 7c, (164, 187, 188)). Comparado con recuperaciones pasivas, las carreras hasta la extenuación con recuperaciones activas son un 40-80% menores (164, 187-190). Además, cuando consideramos carreras hasta la extenuación durante un ejercicio 15seg/15seg, el $T@VO_{2max}$ absoluto podría no diferir entre recuperación activa y pasiva (190) (ES = -0,3), pero el ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo de ejercicio es sustancialmente mayor cuando se realiza una recuperación activa (ES = +0,9); un factor de obvia importancia cuando implementamos repeticiones predeterminadas de HIT (50, 128, 178). Durante un ejercicio modelo de 30seg/30seg/, comparando con una recuperación pasiva, intensidades de recuperación entre en 50% y el 67% del VO_{2max} se asocian con pequeños y muy grandes aumentos del $T@VO_{2max}$ (ES = +0,4 y +0,1 respectivamente) y el ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo de ejercicio (ES = +2,3 y +4,1 respectivamente) (164, 188). Incrementar la intensidad de la recuperación al 84% reduce moderadamente el $T@VO_{2max}$ (ES = -0,6), pero incrementa mucho el ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo de ejercicio (ES = +3,4). Tomados en conjunto, estos estudios sugieren que, para formatos de HIT cortos examinados hasta ahora, las intensidades de los intervalos de recuperación sobre el 70% de la vVO_{2max} deberían recomendarse para incrementar el $T@VO_{2max}$ y el ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo de ejercicio (23). El hecho de que la recuperación activa tenga un probable mayor impacto en el $T@VO_{2max}$ durante un 30seg/30seg (164, 188) comparado con un 15seg/15seg (190) se relaciona con el hecho de que el VO_{2max} alcanza valores más bajos durante 30seg de recuperación pasiva, lo cual afecta directamente a los niveles del VO_{2max} durante el siguiente esfuerzo. Por esta razón, nosotros recomendamos programar recuperaciones pasivas menores o iguales a 15-20seg para deportistas no entrenados, los cuales no están familiarizados con las recuperaciones activas, y/o realizar recuperaciones activas con un periodo de recuperación mayor a los 20seg). En general, las características de las intensidades de los periodos de recuperación pueden ser ajustadas en base a la intensidad de trabajo, utilizando mayores intensidades de recuperación para intensidades bajas de trabajo (23), y menores intensidades de recuperación para intensidades mayores de trabajo o intervalos de más duración (117, 177, 179).

3.1.2.4. Duración de las series, bloques y $T@VO_{2max}$:

Dividir las sesiones de HIT en bloques ha demostrado reducir el $T@VO_{2max}$ total (50, 128, 178). Por ejemplo, en corredores de resistencia jóvenes entrenados ($vVO_{2max} = 17,7 \pm 0,3$ km/h), realizar 4min de recuperación (30seg parados y 3min al 50% de la vVO_{2max}) cada 6 repeticiones de 30seg/30seg fue asociado con un moderadamente menos $T@VO_{2max}$ (ES = -0,8) a pesar de un gran incremento del tiempo hasta la extenuación (ES = +4,3); el ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo de ejercicio disminuyó bastante también (ES = -2,3) (178). Esto está probablemente relacionado con el tiempo que los deportistas necesitan para volver a unos niveles altos de VO_{2max} después de cada periodo de recuperación, desconsiderando utilizar una recuperación activa. Mientras que se podría recomendar HIT hasta la extenuación para optimizar el $T@VO_{2max}$, esto probablemente sería un desafío, psicológicamente hablando, tanto para entrenadores como para deportistas; esto es porque probablemente los deportistas no suelen realizar sesiones de HIT hasta la extenuación.

En la práctica, el número de intervalos programados debería de estar relacionado con los objetivos de la sesión ("carga" total o $T@VO_{2max}$ total esperado), así como al tiempo necesario para alcanzar el VO_{2max} y el ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo de ejercicio estimado de la sesión. El tiempo necesario para alcanzar el VO_{2max} durante diferentes intensidades en los intervalos de trabajo y recuperación que involucran HIT corto (30seg/30seg) ha sido recientemente examinado in deportistas jóvenes entrenados (164, 179, 188). No sorprendentemente, estos estudios muestran tiempos más cortos necesarios para alcanzar valores de VO_{2max} a intensidades mayores o iguales al 105% vVO_{2max} e intensidades de descanso mayores o iguales al 60% de la vVO_{2max} . Al contrario, utilizando intensidades de trabajo y/o recuperación ligeramente menor (i.e. trabajo: 100% y recuperación: 50% vVO_{2max}) los corredores necesitan más de 7min para alcanzar el VO_{2max} . A pesar de la falta de diferencias estadísticas (164, 179, 188), todos los ES entre los diferentes ratios de trabajo/recuperación son "pequeños" a "muy grandes". En el campo, el tiempo necesario para alcanzar el VO_{2max} podría ser acelerado manipulando las variables del HIT durante las primeras repeticiones de la sesión, i.e. utilizando una intensidad mayor en los intervalos de trabajo y/o recuperación de las primeras 2 o 3 repeticiones, o utilizando intervalos más largos y/o recuperaciones más cortas.

Si nosotros consideramos que el objetivo de $T@VO_{2max}$ por sesión es sobre los 10min para aumentar adaptaciones cardiopulmonares importantes (Sección 3.1.1.5), los deportistas deberían realizar 30min de ejercicio utilizando un formato 30seg (110% vVO_{2max})/ 30seg (50% vVO_{2max}), ya que el ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo de ejercicio total es aproximadamente el 30% /Fig. 7a). Ya que es irreal realizar una única sesión de 30min, es posible dividirla en tres bloques de 10-12 repeticiones (añadiendo 1-2min por bloque para compensar el tiempo necesario para recuperar el VO_{2max} durante el segundo o tercer bloque. Esta sesión es típicamente utilizada por corredores de resistencia de élite en el campo. Un volumen menor (menos repeticiones o menos bloques) puede ser utilizado en otros deportes (i.e. en deportes de equipo, un $T@VO_{2max}$ de 5 a 7min puede ser suficiente (116)) y/o para mantener durante periodos de descarga o recuperación en las programaciones de deportistas de resistencia. En balonmano de élite, por ejemplo, 2 x (20 x 10seg [110% VIFT]/20seg [0]) se realiza comúnmente, y podría permitir a los jugadores conseguir sobre 7min al VO_{2max} (considerando un ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo de ejercicio del 35%; Buchheit M, datos no publicados). En fútbol, sesiones como 2 x (12-15 x 15seg [120% VInc.Test]/15seg

[0] se realizan a menudo (95), las cuales consiguen sobre 6min a VO_{2max} (14min con un ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo de ejercicio sobre el 45% (190)).

3.1.3. Intervalos cortos Vs largos y $T@VO_{2max}$:

Una comparación directa entre sesiones HIT cortas y largas, con respecto al $T@VO_{2max}$, solo se ha realizado dos veces en deportistas altamente entrenados. En estudio de Gajer et al. (174) comparó el $T@VO_{2max}$ entre 6x600m (sesión en pista, 102% vVO_{2max} corriendo sobre 1min40seg) y 10 repeticiones de 30seg/30seg (intensidad de trabajo/recuperación 105/50% de la vVO_{2max}) en corredores de media distancia de élite ($vVO_{2max} = 21,2 \pm 0,6$ km/h). Mientras que el VO_{2max} alcanzado durante la sesión de pista fue el 105% del VO_{2max} , realmente no se alcanzó el VO_{2max} durante la sesión 30seg/30seg. Si la sesión en pista es considerada como la sesión "referencia" (el ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo de ejercicio fue 44%), el $T@VO_{2max}$ fue "bastante" menor durante los intervalos 30seg/30seg (10%, ES = -2,6). Igualmente, Millet et al. (2003) mostraron que realizar intervalos 2min/2min permitió a los triatletas obtener un $T@VO_{2max}$ mayor comparado con una sesión 30seg/30seg (ES = +2,2, ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo ejercicio = +2,2). Sin embargo, los intervalos largos son "moderadamente" menos "eficientes" que un esfuerzo modelo de 60seg/30seg (ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo de ejercicio = -0,8) (128). Tomados en conjunto, estos datos sugieren que intervalos largos y/o intervalos cortos con un ratio trabajo/recuperación >1 deberían ser utilizados para obtener un mayor ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo de ejercicio.

3.1.4. Respuestas del VO_{2max} a secuencias de sprints repetidos:

En comparación con la cantidad de datos disponibles sobre las respuestas cardiorrespiratorias de HIT con intervalos largos y cortos, se han presentado relativamente pocos sobre las respuestas agudas de RSS. Un RSS es generalmente definido como la repetición de más de dos sprints *all-out* cortos (menor o igual a 10seg) con un periodo de recuperación corto (<60seg) (191). Ya en los años 1990, Balsom et al. (1992) demostraron que el RSS tiene una demanda aeróbica (i.e. <65% VO_{2max}). Además, Dupont et al. (2005) demostraron que futbolistas pueden alcanzar el VO_{2max} durante sprints repetidos. Desde nuestro conocimiento, sin embargo, el $T@VO_{2max}$ durante RSS no ha sido realizado. Con el propósito de esta revisión, nosotros hemos reanalizado datos de estudios anteriores (30, 158, 193, 194) para proveer valores del $T@VO_{2max}$ para varios tipos de RSS (Fig. 8, panel de arriba (13, 30, 158, 192-195)). Cuando manipulamos las variables clave ya descritas (Fig. 2, (35)), el VO_{2max} a menudo se alcanza y sostiene durante el 10-40% de la duración total del RSS (i.e. 10-60seg; Fig. 8a). Si el RSS se repite dos o tres veces por sesión, como se realiza a menudo en la práctica (180, 196, 197), la mayoría de los deportistas pueden estar entre 2-3min al VO_{2max} durante sprints repetidos. Para incremental el $T@VO_{2max}$ durante un RSS, parece que los sprints/esfuerzos deberían ser de al menos 4seg, y que la recuperación debería ser activa o menor de 20seg (Fig. 8, panel de abajo, (13, 30, 158, 192-195)). La introducción de saltos después de los sprints (193), y/o cambios de dirección (194), también tiene interés, ya que esto podría aumentar la demanda sistémica de O_{2max} sin la necesidad de incrementar la distancia de sprint, lo cual podría incrementar la carga muscular y/o el riesgo de lesión (ver Parte II de la revisión). Sin embargo, con periodos de recuperación pasiva muy cortos (i.e. 17seg), algunos deportistas pueden alcanzar valores de VO_{2max} repitiendo sprints de solo 3seg (15m). Vale la pena señalar, sin embargo, que durante todos los RSS examinados aquí (Fig. 8, excepto Dupont et al. (2005)). Un número de jugadores no alcanzó el VO_{2max} , y el $T@VO_{2max}$ mostro una alta variabilidad interindividual (CV = 30-100%). Más precisamente, cuando consideramos los cuatro tipos de RSS realizados por el mismo grupo de 13 deportistas (193, 194), se observa como seis (45%) de ellos alcanzan el VO_{2max} en cuatro ocasiones, uno (8%) en tres, cuatro (31%) en dos, y dos (15%) nunca alcanzan valores de VO_{2max} en ningún tipo de RSS. Cuando agrupamos los datos de los cuatro tipos de RSS, el número de veces que se alcanza el VO_{2max} es inversamente relacionado con el VO_{2max} ($r = -0.61$, 90% CL -0.84, -0.19). Igualmente, el $T@VO_{2max}$ total en los cuatro tipos diferentes de RSS es inversamente correlacionado con el VO_{2max} ($r = -0.55$; 90% CL -0.85, 0.00). Sin embargo, no hubo relación entre el número de veces que se alcanzó el VO_{2max} o el $T@VO_{2max}$ y la cinética del VO_{2max} al inicio del ejercicio, como se mide durante un ejercicio submáximo (144). Estos datos muestran que, con respecto al $T@VO_{2max}$ utilizando RSS puede ser cuestionado su aplicación en algunos deportistas, especialmente los de un nivel alto.

3.1.5. Respuestas del VO_{2max} a sesiones intervaladas de sprint:

Es importante que la investigación muestre los beneficios del SIT (126), no obstante, hay, hasta la fecha, pocos datos disponibles que muestren las respuestas fisiológicas agudas de sesiones típicas SIT que se podrían llevar a cabo en la práctica. Tabata et al. (1997) muestran como el VO_{2max} no es alcanzado (pico del 87% del VO_{2max}) durante esfuerzos repetidos de 30seg en ciclismo (200% de la pVO_{2max} y por lo tanto no es realmente *all-out*) separados por recuperaciones pasivas de 2min. En contraste con esto, nosotros recientemente mostramos (142) que durante una "verdadera" sesión SIT *all-out*, la mayoría de sujetos alcanzaron valores cercanos (o sobre) el 90% de su VO_{2max} y FC). Sin embargo, el $T@VO_{2max}$ fue solo de 22seg de media (rango de 0 a 60seg, con dos sujetos que no mostraron valores >90% del VO_{2max}) (142), y el VO_{2max} solo fue alcanzado por cinco sujetos (50%). Esta importante respuesta individual del VO_{2max} a las sesiones SIT son explicadas en parte por las variaciones a nivel cardiorrespiratorio (i.e. hay una correlación negativa entre el $T@VO_{2max}$ y el VO_{2max} ($r = -0.68$; 90% CL -0.9, -0.2)) y a la cinética del VO_{2max} (Submáximo) al terminar el ejercicio ($r = 0.68$; 90% CL 0.20,

0.90). Como con el RSS, no hay relación entre el $T@VO_{2max}$ y la cinética del VO_{2max} al inicio del ejercicio. Finalmente, vale la pena resaltar que aunque el VO_{2max} pulmonar no es alto durante el SIT, es probable que la demanda de O_{2max} muscular, especialmente a medida que aumenta el número de repeticiones de sprint. Se ha demostrado que existe un cambio progresivo en el metabolismo energético durante una sesión SIT, con una mayor dependencia del metabolismo oxidativo cuando los sprints son repetidos (199, 200). A lo largo de estas mismas líneas, los niveles de desoxigenación muscular y los ritmos de reoxigenación post-sprint han demostrado ser más bajos y más lentos, respectivamente, con el incremento del número de repeticiones. Esta respuesta implica una mayor demanda de O_{2max} en el musculo con el incremento de las repeticiones de sprint (ya que la entrega de O_{2max} mejora probablemente con la hiperemia inducida por el ejercicio) (142).

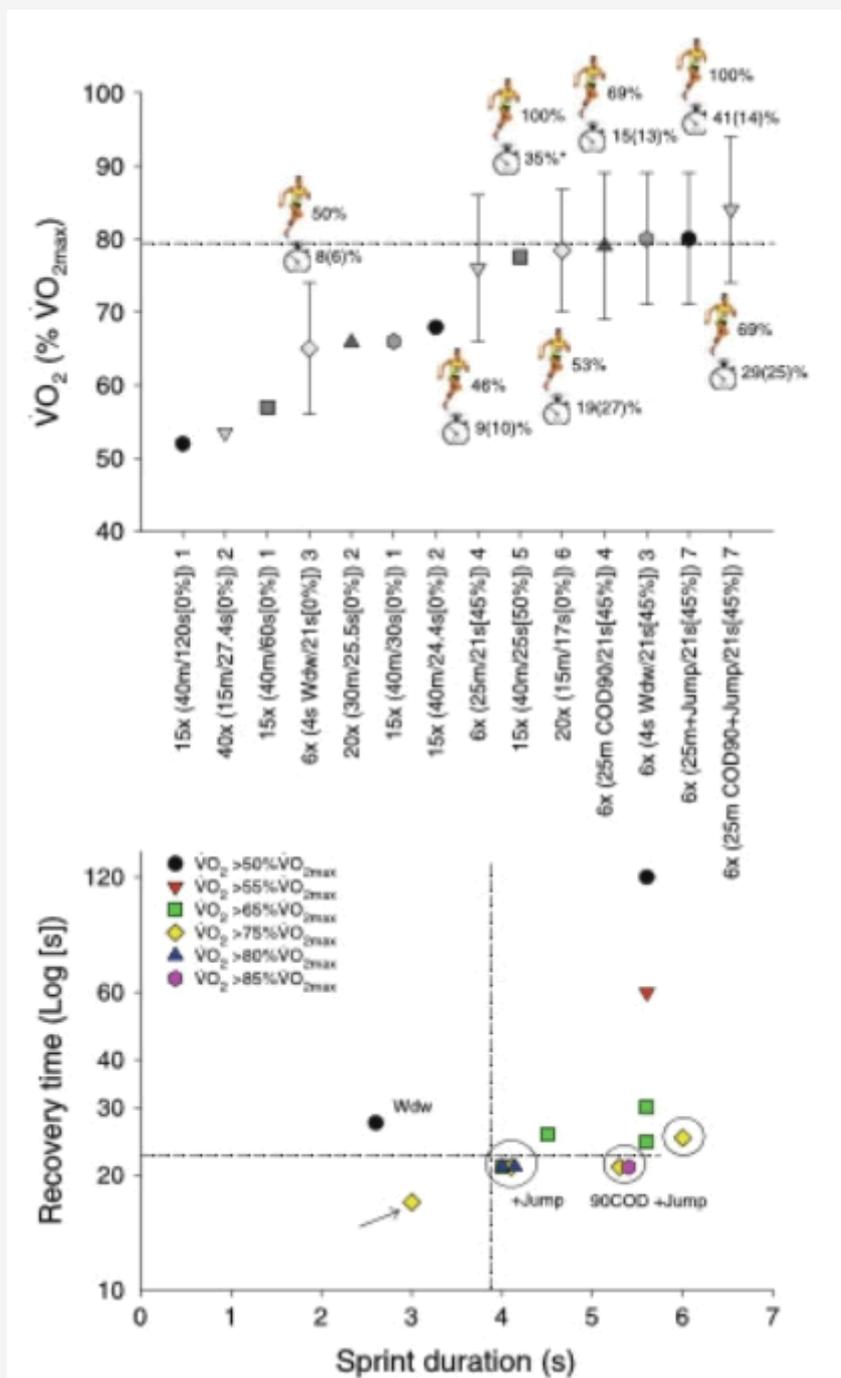


Figura 8.a La respuesta media \pm SD del VO_{2max} durante unas secuencias seleccionadas de sprint repetidos. La intensidad del intervalo de recuperación (i.e. [porcentaje]) se expresa como proporción de la vVO_{2max} . Cuando está disponible, se presenta tanto el porcentaje de participantes que alcanzan el VO_{2max} como la media \pm SD de tiempo que pasan sobre el 90% del VO_{2max} . **b** La media de las respuestas del VO_{2max} durante secuencias de sprints repetidos que se presentan en la sección **a** son categorizadas en seis códigos de colores (basándose en el % del VO_{2max} alcanzado) y entonces es trazado como una función de la duración del sprint y la

recuperación. Las líneas discontinuas representan las duraciones de sprint y recuperación más cortas que se necesitan para alcanzar al menos el 80% del VO_{2max} . Los círculos indican una recuperación activa. Nota (ver flecha) que el 75% del VO_{2max} puede ser alcanzado con sprints muy cortos (i.e. 15m) con recuperaciones pasivas cuando los sprints están separados por pausas muy cortas (i.e. 17seg). Referencias: 1 (13); 2(195); 3 (158); 4 (194); 5 (192); 6 (30) y 7 (193). COD: cambios de dirección, VO_{2max} : consumo de oxígeno, VO_{2max} : consumo máximo de oxígeno, vVO_{2max} : mínima velocidad de carrera requerida para alcanzar el máximo VO_{2max} , Wdw: se refiere a sprints realizados en tapiz rodante no motorizado.

3.1.6. Resumen:

En esta sección de la revisión, hemos destacado las respuestas del VO_{2max} a varias formas de HIT. Parece que la mayoría de formatos de HIT, cuando se manipulan correctamente, pueden permitir a los deportistas alcanzar el VO_{2max} . Sin embargo, existen diferencias importantes en el $T@VO_{2max}$ en base al deportista y al formato de HIT. Sesiones de RSS y SIT permiten un $T@VO_{2max}$ limitado respecto a HIT con intervalos largos y cortos. Datos en deportistas de alto nivel (128, 174) sugieren que intervalos largos y/o cortos con un ratio trabajo/recuperación >1 deberían permitir un mayor ratio $T@VO_{2max}$ /tiempo de ejercicio durante sesiones HIT. Los métodos que desarrollan a largo plazo el VO_{2max} y las adaptaciones del rendimiento utilizando diferentes formatos de HIT que implican cantidades variables de $T@VO_{2max}$, tanto como el camino más eficiente de acumular un $T@VO_{2max}$ dado en una sesión HIT (i.e. intermitente vs. Continuo), tiene que ser determinado todavía.

3.2. Respuesta cardiaca con HIT y esfuerzos de sprint repetidos:

Debido a los diversos aspectos temporales (70) y la posible disociación entre el VO_{2max} y el gasto cardíaco (Qc) durante el ejercicio intenso (201, 202), el $T@VO_{2max}$ podría no ser el único criterio importante a examinar cuando evaluamos la respuesta cardiopulmonar de una sesión HIT dada. Se cree necesario alcanzar y mantener un elevado llenado cardíaco para mejorar la función cardiaca máxima (58, 59, 203), entrenando a una intensidad asociada al SV máximo (201). Definir esta intensidad clave, sin embargo, parece difícil, ya que requiere una monitorización constante del SV durante el ejercicio (Ej.: 25-27, 201, 204). Curiosamente, si el SV es máxima a v/pVO_{2max} , o antes, está todavía en debate (205-207). El comportamiento del SV durante un test incremental es probable que dependa del protocolo (202) y este afectado por el estatus de entrenamiento (Ej.: el llenado ventricular depende en parte del volumen sanguíneo, el cual tiende a ser mayor en deportistas entrenados) (296), aunque no siempre se da el caso (207). Además, la naturaleza del ejercicio, i.e. potencia constante vs incremental vs intermitente, así como la posición del cuerpo (más supina en remo y natación vs más vertical en carrera y ciclismo), podría también afectar al SV alcanzado y mantenido durante todo el ejercicio. De hecho, son limitados los datos en cuanto a la función cardiaca durante ejercicios parecidos a los prescritos durante las sesiones HIT en campo, i.e. periodos de potencia constante a alta intensidad. En estos estudios, el SV alcanza valores máximos sobre 1min (26), sobre 2min (24, 25, 204) y sobre 4min (27), y entonces desciende (24, 26, 204) o se mantiene estable (25, 27) antes de la fatiga. Inconsistencias en la intensidad del ejercicio, la experiencia individual en el entrenamiento y los comportamientos hemodinámicos particulares (Ej.: presencia de deflexión de la FC en altas intensidades (208)), así como las consideraciones metodológicas en las mediciones del SV podrían explicar estas diferencias (205-207). Como se ha analizado en la Sec. 2.2., alternas periodos de trabajo y recuperación durante HIT con intervalos cortos podría también inducir variaciones en la acción de bombeo venoso muscular, que puede, a su vez, limitar el mantenimiento de un SV alto (60).

Siguiendo las creencias del entrenador alemán Woldemar Gerschler, en los 1930, Cumming reportó, en 1972, que los valores máximos de SV fueron alcanzados durante el periodo de recuperación, y no durante el ejercicio, desconsiderando la intensidad del ejercicio (209). Aunque estos resultados se obtuvieron durante un ejercicio supino en pacientes desentrenados, y a pesar de las reclamaciones contradictorias (210), ellos contribuyeron a la creencia de que los periodos de recuperación repetidos y su alto SV asociado representaban la efectividad del HIT en la función cardio-circulatoria (211). Apoyando parcialmente esto, Takahashi et al. (2000) también mostraron en hombres desentrenados que durante los primeros 80seg de una recuperación activa (20% del VO_{2max}), los valores de SV eran un 10% mayores que durante el ejercicio de ciclismo submáximo precedente (60% del VO_{2max}). Sorprendentemente, estos cambios particulares e hipotéticos en el SV durante la recuperación nunca antes habían sido examinados durante una sesión típica de HIT en deportistas. Nosotros recientemente hemos recolectado datos hemodinámicos en ciclistas bien entrenados que parcialmente confirman los resultados de Cumming (Buchheit M et al., datos no publicados, Fig. 9). Independientemente del ejercicio, i.e. incremental test, 3min a pVO_{2max} o sprints repetidos de 15seg (30% de la potencia anaeróbica de reserva, APR), el SV de ciclistas bien entrenados (potencia pico = 450w, VO_{2max} = 69ml/min/kg, volumen de entrenamiento = 10 horas/semana) mostraron valores consistentes más altos durante los periodos de recuperación (posición vertical en la bici). Mientras que reconocemos las limitaciones inherentes al método de impedancia utilizado (PhysioFlow, Manatec, Francia (213, 214)), y mientras son necesarios más estudios, estos datos preliminares permiten apoyar la creencia que a pesar de su naturaleza supramáxima, las sesiones HIT podrían desencadenar adaptaciones cardiocirculatorias por medio de ajustes cardiovasculares que ocurren específicamente durante los periodos de recuperación. Tomando como ejemplo una sesión

HIT que contiene 3 bloques de 8 repeticiones de 15seg de sprint (30% APR) separados por 45seg de recuperación pasiva (tiempo suficiente para alcanzar el pico de SV). Tal formato permitiría a los deportistas mantener su SV pico para $24 \times 20 \text{seg} = 480 \text{seg}$, lo cual es similar a lo que podemos sostener durante un ejercicio constante hasta la extenuación (25). Curiosamente, el estudio de Fontana et al. (2011) también observó, utilizando un método de reinspiración en hombres desentrenados, valores de SV “en gran parte” mayores en el final de 30seg sprint *all-out* comparado con un test incremental hasta la extenuación (127 ± 37 vs 94 ± 15 ml, ES = +1,3). Sin embargo, la FCmax fue “mucho” menor (149 ± 26 vs 190 ± 12 pulsaciones/min, ES = -2,2), por lo que no hubo diferencias substanciales en el gasto cardiaco máximo (Qcmax) ($18,2 \pm 3,3$ vs $17,9 \pm 2,6$ L/min, ES = -0,1).

Para concluir, la intensidad y naturaleza óptima del ejercicio necesaria para producir mayores adaptaciones del SV no se conoce. Para conocer la respuesta a esta pregunta se necesita tener en cuenta las características individuales, tales como el nivel de rendimiento, el estado de entrenamiento y diversos comportamientos hemodinámicos individuales a diferentes modelos de ejercicio. De forma práctica, basándose en los datos limitados disponibles, podría recomendarse prescribir una variedad de métodos diferentes de entrenamiento para obtener las ventajas de adaptación de cada formato de ejercicio. Las sesiones HIT, incluidas las cercanas a los intervalos largos con largos periodos de recuperación (Ej.: >3-4min/>2min) podría permitir a los deportistas alcanzar un alto SV durante el intervalo de trabajo (y posiblemente durante el intervalo de descanso). En esta misma línea, intervalos de 4min sobre el 90-95% de la $v/pVO_{2\text{max}}$ parece ser el que más interés recibe en mejorar la función cardiopulmonar (Ej.: 46, 59, 2016). Alternativamente, repetir intervalos cortos de trabajo supramáximos (Ej.: 15-30seg) con intervalos de recuperación largos (>45seg) podría también ser efectivo para alcanzar altos valores durante el ejercicio (215) y posiblemente, en la recuperación (Fig. 9). Sin embargo, si las adaptaciones en el Qcmax son comparables realizando sesiones de intervalos cortos y largos (i.e. continuo vs intermitente), o si conseguir un cierto tiempo al Qcmax (T@Qcmax) es necesario para maximizar estas adaptaciones, se desconoce todavía. En el único estudio longitudinal comparan datos del efecto de HIT corto vs largo sobre la función cardiovascular máxima en estudiantes universitarios ($VO_{2\text{max}}$: 55-60ml/min/kg) (59), hubo una “pequeña” tendencia a una mayor mejora del QCmax en el protocolo de intervalos largos (ES = +1 vs +0,7 para 4x4min vs 15/15, respectivamente).

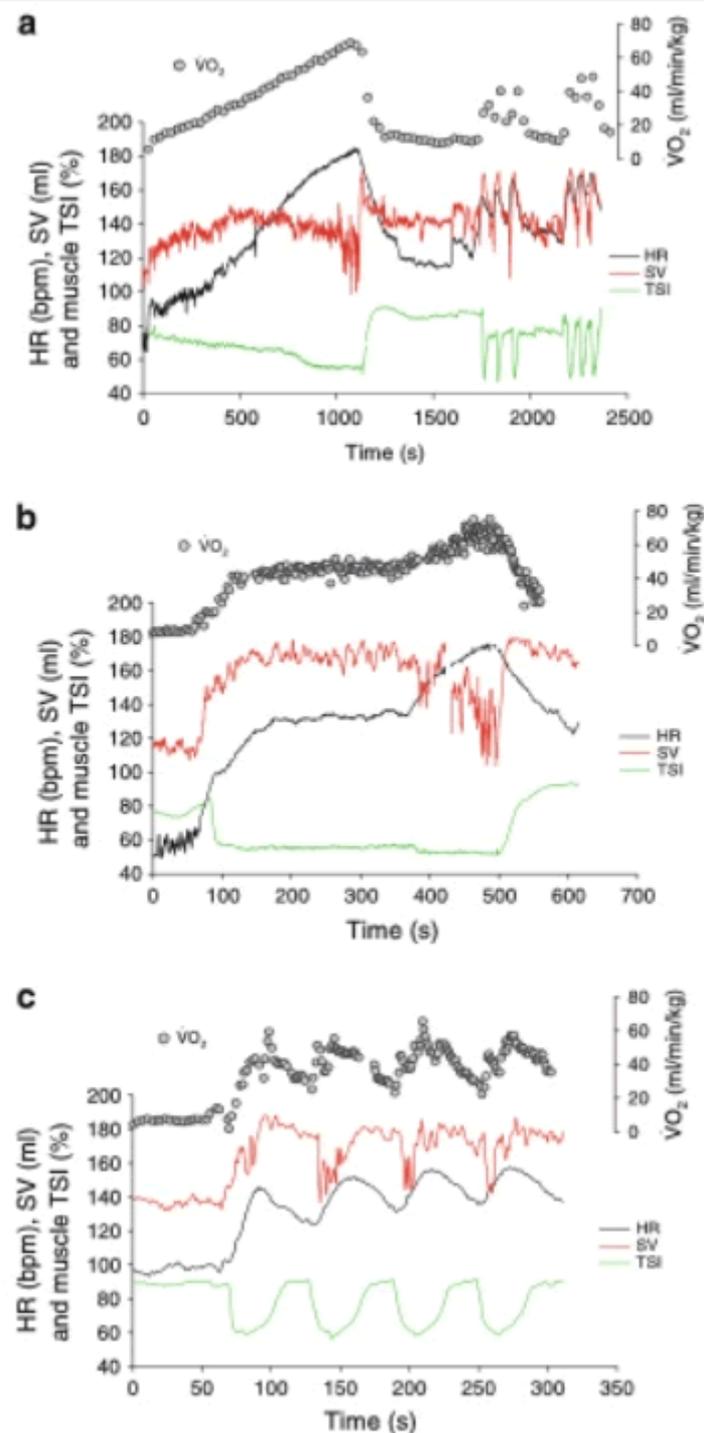


Figura 9.a El VO_{2max} , la FC, la SV y la oxigenación muscular (TSI) durante un test incremental seguidos de dos series de 3 sprints supramáximos de 15seg (35% APR); **b** bloque de 5min al 50% de la pVO_{2max} inmediatamente seguido de 3min a pVO_{2max} ; y **c** la temprana fase de una sesión HIT (i.e. las primeras 4 repeticiones de (15seg [35% APR]/45seg [pasivo])) en ciclistas bien entrenados. Tenga en cuenta las seducciones en el SV para intensidades >50% del VO_{2max} tanto durante el test incremental como el constante, lo cual se asocia con una mayor deoxigenación durante el test incremental. En contraste, los valores máximos de SV se observan durante los periodos post-ejercicio, tanto en ejercicios incrementales, máximo o supramáximos. APR: reserva de potencia anaeróbica, HIT: entrenamiento intervalado de alta intensidad, FC: frecuencia cardiaca, VO_{2max} : consumo máximo de oxígeno, pVO_{2max} : mínima potencia asociada al VO_{2max} , SV: volumen sistólico, TSI: índice de saturación

Cabe destacar que el estudio de Seiler et al. (2013) mostró, en ciclistas recreacionales (VO_{2max} : sobre 52ml/min/kg), que acumular 32min de trabajo al 90% de la FCmax puede inducir mayores ganancias adaptativas que 16min de trabajo sobre el 95% de la FCmax (176). Mientras que el SV no fue medido, estos resultados contrastan con la idea de que la intensidad

del ejercicio determina directamente la respuesta del entrenamiento (59). Más bien, ellos muestran que tanto la intensidad del ejercicio como la duración acumulada del entrenamiento intervalado puede actuar de una forma integrada para estimular las adaptaciones fisiológicas en esta población (176). En este último caso (176), la disminución de la intensidad del ejercicio puede haber permitido un mayor $T@Q_{cmax}$ (o cercano al Q_{cmax}), y, a su vez, una mayor adaptación. Si se observan resultados diferentes en deportistas altamente entrenados quienes es probable que requieran niveles de stress mayores para futuras adaptaciones, aún se desconoce. Finalmente, ya que el $T@Q_{cmax}$ se ha mostrado muy correlacionado con el tiempo hasta la extenuación durante un ejercicio severo (r variando de 0.79; 90% CL 0.45, 0.93 a r 0.98; 90% CL 0.94, 0.99) (25), las estrategias de ritmo pueden incrementar el tiempo hasta la extenuación pero sostener una demanda alta cardiorespiratoria puede también ser interesante. Por ejemplo, ajustar la intensidad de trabajo basándose en las respuestas del VO_{2max} (VO_{2max} -ejercicio constante al 87% de la pVO_{2max}) permite moderar el incremento del tiempo hasta la extenuación (20min \pm 10min vs 15min \pm 5min, ES = +1,0) y, a su vez, $T@Q_{cmax}$ (16min \pm 8min vs 14min \pm 4min, ES = +0,9) (25).

4. Conclusiones:

En la Parte I de esta revisión, se han discutido los diferentes aspectos de la programación del HIT respecto al $T@VO_{2max}$ y la función cardiopulmonar. Existen importantes diferencias entre deportistas y entre formatos de HIT, por lo tanto es difícil precisar recomendaciones que ofrecer. La mayoría de los formatos HIT, si se manipulan adecuadamente, pueden permitir a los deportistas alcanzar el VO_{2max} , pero las sesiones RSS y SIT permite un limitado $T@VO_{2max}$ comparado con las sesiones HIT tanto de intervalos largos como cortos. La respuesta del VO_{2max} durante RSS y SIT parece depender del nivel del deportista, con los atletas más en forma es menos posible alcanzar el VO_{2max} durante estos tipos de entrenamiento. Basándose en esta revisión, pueden realizarse las siguientes recomendaciones:

Para individualizar la intensidad del ejercicio y la respuesta fisiológica aguda específica objetivo (Fig. 1), la v/pVO_{2max} y la ASR/APR o VIFT son probablemente las referencias más precisas para diseñar HIT con intervalos largos (mayores o iguales a 1-2min) y cortos (menores o iguales a 45seg), respectivamente. Para sesiones HIT basadas en carrera, comparando con el ASR, VIFT integra las habilidades de recuperación entre esfuerzos y las capacidades COD que hacen la VIFT especialmente relevante para programar carreras supramáximas intermitentes cortas realizadas con COD, como se realiza en la mayoría de deportes de equipo y raqueta.

Especialmente en deportistas bien entrenados, los cuales realizan ejercicios involucrando grupos musculares grandes, y asumiendo la acumulación de $T@VO_{2max}$ puede maximizar el estímulo de entrenamiento para mejorar el rendimiento, nosotros recomendamos HIT largos y cortos con un ratio trabajo/recuperación >1 (ver Parte II, Tabla 1 sugerencias prácticas para la programación). Adicionalmente:

Debería haber poco tiempo entre el calentamiento y el inicio de la sesión HIT para acelerar el tiempo necesario hasta alcanzar el VO_{2max} . La intensidad del calentamiento puede ser menor o igual al 60-70% de la v/pVO_{2max} , o juegos (a moderada intensidad) para deportistas de deportes de equipo y raqueta.

El volumen total de la sesión debería permitir a los deportistas pasar sobre 5min (deportes de equipo y raqueta) y sobre 10min (deportes de resistencia) a VO_{2max} .

Hasta que se aporten nuevas evidencias, se desconoce la importancia del llenado ventricular continuo vs repetido a altos ritmos para desarrollar adaptaciones cardiovasculares. Intervalos de trabajo cercanos al máximo y prolongados actualmente parecen ser la opción HIT más recomendada (i.e. >4 min al 90-95% de la v/pVO_{2max} , con la probable disminución de la carga externa con el aumento de la fatiga para prolongar el $T@Q_{cmax}$).

5. Perspectivas:

Se requieren más investigaciones para especificar las respuestas cardiopulmonares agudas del HIT/RST/SIT en poblaciones determinadas como jóvenes y mujeres, así como la influencia del nivel cardiorespiratorio y de entrenamiento sobre estas respuestas. Más investigaciones son también necesarias para mejorar nuestros conocimientos sobre como manipular óptimamente las variables del HIT, en particular, las condiciones medioambientales (Ej.: altitud (21), calor (217)), dónde las sesiones HIT "típicas" sugeridas por esta revisión no pueden realizarse. El impacto de la hora del día, el tiempo dentro de una sesión, y contenidos externos al entrenamiento también deberían ser examinados, así como que la mayoría de los estudios se realizan con participantes "frescos" en condiciones climatológicas controladas, mientras en la práctica, las sesiones HIT se realizan a menudo en un estado de fatiga acumulada (al final de una sesión de deporte de equipo o por la tarde después de una sesión de entrenamiento exhaustiva por la mañana). También es importante entender las respuestas fisiológicas de las sesiones técnicas/tácticas para el desarrollo exitoso de los deportistas de deportes de equipo, por lo que las sesiones HIT óptimas pueden ser programadas como sesiones suplementarias (i.e. como se puede "resolver el mejor puzzle de la programación", mientras añadimos que se "pierde" durante las sesiones técnico/tácticas

(151), ya que se ha mostrado que las adaptaciones fisiológicas y de rendimiento se llevan a cabo en relación con la acumulación de carga de entrenamiento a altas intensidades (218)). Finalmente, ya que en deportes de equipo las mejoras en el nivel físico podrían no tener un impacto similar en el rendimiento de carrera en los partidos para todos los jugadores (influencia de la posición de juego, el sistema de juego, el estilo individual de juego) (63, 98, 219, 220), debería de individualizarse las sesiones HIT y valorar utilizando un enfoque coste/beneficio. Como se discutirá en la Parte II, consideraciones de otros aspectos importantes para la programación HIT, como la contribución de la energía glicolítica anaeróbica, la carga neuromuscular y la tensión musculoesquelética, deberían también ser consideradas. En futuros estudios también se necesitará examinar las adaptaciones a largo plazo de todas las formas de HIT/esfuerzos *all-out* repetidos presentados en esta revisión con respecto al género, la edad, y el nivel/experiencia de entrenamiento.

Agradecimientos: En la preparación de esta revisión no se utilizaron fuentes de financiación. Los autores no tienen conflictos de interés que sean directamente relevante en el contenido de esta revisión.

REFERENCIAS

1. Laursen PB. (2010). Training for intense exercise performance: high-intensity or high-volume training? *Scand J Med Sci Sports*;20(Suppl 2):1-10.
2. Seiler S, Tønnessen E. (2009). Intervals, thresholds, and long slow distance: the role of intensity and duration in endurance training. *Sports Science*;13:32-53.
3. Billat LV. (2001). Interval training for performance: a scientific and empirical practice: special recommendations for middle- and long-distance running. *Part I: aerobic interval training. Sports Med*;1:13-31.
4. Billat LV. (2001). Interval training for performance: a scientific and empirical practice: special recommendations for middle- and long-distance running. *Part II: anaerobic interval training. Sports Med*;31:75-90.
5. Laursen PB, Jenkins DG. (2002). The scientific basis for high-intensity interval training: optimising training programmes and maximising performance in highly trained endurance athletes. *Sports Med*;32:53-73.
6. Laursen PB. (2012). Interval training for endurance. In: Mujika I, editor. *Endurance training: science and practice (pp. 41-50)*. Vitoria-Gasteiz: *Inigo Mujika*. ISBN 978-84-939970-0-7.
7. Bishop D, Girard O, Mendez-Villanueva A. (2011). Repeated-sprint ability—Part II: recommendations for training. *Sports Med*;41:741-56.
8. Gibala MJ, Little JP, van Essen M, et al. (2006). Short-term sprint interval versus traditional endurance training: similar initial adaptations in human skeletal muscle and exercise performance. *J Physiol*;575:901-11.
9. Iaia FM, Bangsbo J. (2010). Speed endurance training is a powerful stimulus for physiological adaptations and performance improvements of athletes. *Scand J Med Sci Sports*;20(Suppl. 2):11-23.
10. Astrand I, Astrand PO, Christensen EH, et al. (1960). Intermittent muscular work. *Acta Physiol Scand*;48:448-53.
11. Astrand I, Astrand PO, Christensen EH, et al. (1960). Myohemoglobin as an oxygen-store in man. *Acta Physiol Scand*;48:454-60.
12. Christensen EH, Hedman R, Saltin B. (1960). Intermittent and continuous running. (*A further contribution to the physiology of intermittent work.*) *Acta Physiol Scand*;50:269-86.
13. Balsom PD, Seger JY, Sjodin B, et al. (1992). Maximal-intensity intermittent exercise: effect of recovery duration. *Int J Sports Med*;13:528-33.
14. Midgley AW, McNaughton LR. (2006). Time at or near VO₂max during continuous and intermittent running: a review with special reference to considerations for the optimisation of training protocols to elicit the longest time at or near VO₂max. *J Sports Med Phys Fitness*;46:1-14.
15. Midgley AW, McNaughton LR, Wilkinson M. (2006). Is there an optimal training intensity for enhancing the maximal oxygen uptake of distance runners? Empirical research findings, current opinions, physiological rationale and practical recommendations. *Sports Med*;36:117-32.
16. Altenburg TM, Degens H, van Mechelen W, et al. (2007). Recruitment of single muscle fibers during submaximal cycling exercise. *J Appl Physiol*;103:1752-6.
17. Gollnick PD, Piehl K, Saltin B. (1974). Selective glycogen depletion pattern in human muscle fibres after exercise of varying intensity and at varying pedalling rates. *J Physiol*;241:45-57.
18. Midgley AW, McNaughton LR, Jones AM. (2007). Training to enhance the physiological determinants of long-distance running performance: can valid recommendations be given to runners and coaches based on current scientific knowledge? *Sports Med*;37:857-80.
19. Vollaard NB, Constantin-Teodosiu D, Fredriksson K, et al. (2009). Systematic analysis of adaptations in aerobic capacity and submaximal energy metabolism provides a unique insight into determinants of human aerobic performance. *J Appl Physiol*;106:1479-86.
20. Bouchard C, Rankinen T. (2001). Individual differences in response to regular physical activity. *Med Sci Sports Exerc*;33:S446-51.
21. Buchheit M, Kuitunen S, Voss SC, et al. (2012). Physiological strain associated with high-intensity hypoxic intervals in highly trained young runners. *J Strength Cond Res*;26:94-105.
22. Vuorimaa T, Vasankari T, Rusko H. (2000). Comparison of physiological strain and muscular performance of athletes during two intermittent running exercises at the velocity associated with VO₂max. *Int J Sports Med*;21:96-101.

23. Billat LV, Slawinski J, Bocquet V, et al. (2001). Very short (15 s-15 s) interval training around the critical velocity allows middle-aged runners to maintain VO₂max for 14 minutes. *Int J Sports Med*;22:201-8.
24. Faisal A, Beavers KR, Robertson AD, et al. (2009). Prior moderate and heavy exercise accelerate oxygen uptake and cardiac output kinetics in endurance athletes. *J Appl Physiol*;106:1553-63.
25. Lepretre PM, Lopes P, Koralsztein JP, et al. (2008). Fatigue responses in exercise under control of VO₂. *Int J Sports Med*;29:199-205.
26. Mortensen SP, Damsgaard R, Dawson EA, et al. (2008). Restrictions in systemic and locomotor skeletal muscle perfusion, oxygen supply and VO₂ during high-intensity whole-body exercise in humans. *J Physiol*;586:2621-35.
27. Richard R, Lonsdorfer-Wolf E, Dufour S, et al. (2004). Cardiac output and oxygen release during very high-intensity exercise performed until exhaustion. *Eur J Appl Physiol*;93:9-18.
28. Christmass MA, Dawson B, Arthur PG. (1999). Effect of work and recovery duration on skeletal muscle oxygenation and fuel use during sustained intermittent exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*;80:436-47.
29. Christmass MA, Dawson B, Passeretto P, et al. (1999). A comparison of skeletal muscle oxygenation and fuel use in sustained continuous and intermittent exercise. *Eur J Appl Physiol*;80:423-35.
30. Buchheit M, Laursen PB, Ahmaidi S. (2007). Parasympathetic reactivation after repeated sprint exercise. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*;293:H133-41.
31. James DV, Barnes AJ, Lopes P, et al. (2002). Heart rate variability: response following a single bout of interval training. *Int J Sports Med*;23:247-51.
32. Mourot L, Bouhaddi M, Tordi N, et al. (2004). Short- and long-term effects of a single bout of exercise on heart rate variability: comparison between constant and interval training exercises. *Eur J Appl Physiol*; 92:508-17.
33. Al Haddad H, Laursen PB, Ahmaidi S, et al. (2009). Nocturnal heart rate variability following supramaximal intermittent exercise. *Int J Sports Physiol Perform*;4:435-47.
34. Hoff J, Helgerud J. (2004). Endurance and strength training for soccer players: physiological considerations. *Sports Med*;3:165-80.
35. Buchheit M. (2005). The 30-15 Intermittent Fitness Test: a new intermittent running field test for intermittent sport players—part 1. *Approches du Handball*;87:27-34.
36. Buchheit M, Al Haddad H, Chivot A, et al. (2010). Effect of in- versus out-of-water recovery on repeated swimming sprint performance. *Eur J Appl Physiol*;108:321-7.
37. Guiraud T, Nigam A, Gremeaux V, et al. (2012). High-intensity interval training in cardiac rehabilitation. *Sports Med*;42:587-605.
38. Metcalfe RS, Babraj JA, Fawcner SG, et al. (2012). Towards the minimal amount of exercise for improving metabolic health: beneficial effects of reduced-exertion high-intensity interval training. *Eur J Appl Physiol*;112:2767-75.
39. Hood MS, Little JP, Tarnopolsky MA, et al. (2011). Low-volume interval training improves muscle oxidative capacity in sedentary adults. *Med Sci Sports Exerc*;43:1849-56.
40. Trilk JL, Singhal A, Bigelman KA, et al. (2011). Effect of sprint interval training on circulatory function during exercise in sedentary, overweight/obese women. *Eur J Appl Physiol*;111:1591-7.
41. Cohen J. (1988). Statistical power analysis for the behavioral sciences. *Hillsdale: Lawrence Erlbaum Assoc, Inc.*; p. 599.
42. Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, et al. (2009). Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med Sci Sports Exerc*;41:3-13.
43. Buchheit M, Laursen PB, Kuhnle J, et al. (2009). Game-based training in young elite handball players. *Int J Sports Med*;30:251-8.
44. Castagna C, Impellizzeri FM, Chaouachi A, et al. (2011). Physiological responses to ball-drills in regional level male basketball players. *J Sports Sci*;29:1329-36.
45. Fernandez-Fernandez J, Sanz-Rivas D, Sanchez-Munoz C, et al. (2011). Physiological responses to on-court vs running interval training in competitive tennis players. *J Sports Sci Med*;10:540-5.
46. Impellizzeri FM, Marcora SM, Castagna C, et al. (2006). Physiological and performance effects of generic versus specific aerobic training in soccer players. *Int J Sports Med*;27:483-92.
47. Sheppard JM, Borgeaud R. (2009). Skill based conditioning: a perspective from elite volleyball. *NSCA hot topic series. 2009;December [online]. Available from URL: <http://www.nscalift.org>. [Accessed 12 Dec 2011].*
48. Gabbett TJ. (2006). Skill-based conditioning games as an alternative to traditional conditioning for rugby league players. *J Strength Cond Res*;20:309-15.
49. Hill-Haas SV, Dawson B, Impellizzeri FM, et al. (2011). Physiology of small-sided games training in football: a systematic review. *Sports Med*;41:199-220.
50. Buchheit M, Lepretre PM, Behaegel AL, et al. (2009). Cardiorespiratory responses during running and sport-specific exercises in handball players. *J Sci Med Sport*;12:399-405.
51. Castagna C, Belardinelli R, Impellizzeri FM, et al. (2007). Cardiovascular responses during recreational 5-a-side indoor-soccer. *J Sci Med Sport*;10:89-95.
52. Owen AL, Wong del P, Paul D, Dellal A. (2012). Effects of a periodized small-sided game training intervention on physical performance in elite professional soccer. *J Strength Cond Res*;26:2748-54.
53. Hill-Haas SV, Coutts AJ, Rowsell GJ, et al. (2009). Generic versus small-sided game training in soccer. *Int J Sports Med*;30:636-42.
54. Dellal A, Lago-Penas C, Wong del P, et al. (2011). Effect of the number of ball contacts within bouts of 4 vs. 4 small-sided soccer games. *Int J Sports Physiol Perform*;6:322-33.
55. Rampinini E, Impellizzeri F, Castagna C, et al. (2007). Factors influencing physiological responses to small-sided soccer games. *J Sports Sci*;6:659-66.
56. Hill-Haas S, Coutts A, Rowsell G, et al. (2008). Variability of acute physiological responses and performance profiles of youth soccer players in small-sided games. *J Sci Med Sport*;11:487-90.
57. Hill-Haas S, Rowsell G, Coutts A, et al. (2008). The reproducibility of physiological responses and performance profiles of youth soccer players in small-sided games. *Int J Sports Physiol Perform*;3:393-6.
58. Daussin FN, Ponsot E, Dufour SP, et al. (2007). Improvement of VO₂max by cardiac output and oxygen extraction adaptation

- during intermittent versus continuous endurance training. *Eur J Appl Physiol*;101:377-83.
59. Helgerud J, Hoydal K, Wang E, et al. (2007). Aerobic high-intensity intervals improve VO₂max more than moderate training. *Med Sci Sports Exerc*;39:665-71.
 60. Hoff J, Wisloff U, Engen LC, et al. (2002). Soccer specific aerobic endurance training. *Br J Sports Med*;36:218-21.
 61. Whipp BJ, Higgenbotham MB, Cobb FC. (1996). Estimating exercise stroke volume from asymptotic oxygen pulse in humans. *J Appl Physiol*;81:2674-9.
 62. Saltin B, Blomqvist G, Mitchell JH, et al. (1968). Response to exercise after bed rest and after training. *Circulation*;38:VIII-78.
 63. Mendez-Villanueva A, Buchheit M, Simpson BM, et al. (2013). Match play intensity distribution in youth soccer. *Int J Sport Med*;34:101-10.
 64. Mendez-Villanueva A, Buchheit M, Simpson B, et al. (2011). Does on-field sprinting performance in young soccer players depend on how fast they can run or how fast they do run? *J Strength Cond Res*;25:2634-8.
 65. Di Salvo V, Baron R, Gonzalez-Haro C, et al. (2010). Sprinting analysis of elite soccer players during European Champions League and UEFA Cup matches. *J Sports Sci*;28:1489-94.
 66. Casamichana D, Castellano J, Castagna C. (2012). Comparing the physical demands of friendly matches and small-sided games in semiprofessional soccer players. *J Strength Cond Res*;26:837-43.
 67. Achten J, Jeukendrup AE. (2003). Heart rate monitoring: applications and limitations. *Sports Med*;33:517-38.
 68. Midgley AW, McNaughton LR, Carroll S. (2007). Reproducibility of time at or near VO₂max during intermittent treadmill running. *Int J Sports Med*;28:40-7.
 69. Seiler S, Hetlelid KJ. (2005). The impact of rest duration on work intensity and RPE during interval training. *Med Sci Sports Exerc*;37:1601-7.
 70. Cerretelli P, Di Prampero PE. (1971). Kinetics of respiratory gas exchange and cardiac output at the onset of exercise. *Scand J Respir Dis;Suppl.*:35a-g.
 71. Seiler S, Sjursen JE. (2004). Effect of work duration on physiological and rating scale of perceived exertion responses during self-paced interval training. *Scand J Med Sci Sports*;14:318-25.
 72. Dishman RK, Patton RW, Smith J, et al. (1987). Using perceived exertion to prescribe and monitor exercise training heart rate. *Int J Sports Med*;8:208-13.
 73. Marcora S. (2009). Perception of effort during exercise is independent of afferent feedback from skeletal muscles, heart, and lungs. *J Appl Physiol*;106:2060-2.
 74. Marcora SM. (2011). Role of feedback from Group III and IV muscle afferents in perception of effort, muscle pain, and discomfort. *J Appl Physiol*;110:1499 (author reply 500).
 75. Coutts AJ, Rampinini E, Marcora SM, et al. (2009). Heart rate and blood lactate correlates of perceived exertion during small-sided soccer games. *J Sci Med Sport*;12:79-84.
 76. Marcora SM, Staiano W, Manning V. (2009). Mental fatigue impairs physical performance in humans. *J Appl Physiol*;106:857-64.
 77. Ulmer HV. (1996). Concept of an extracellular regulation of muscular metabolic rate during heavy exercise in humans by psychophysiological feedback. *Experientia*;52:416-20.
 78. Garcin M, Fleury A, Mille-Hamard L, et al. (2005). Sex-related differences in ratings of perceived exertion and estimated time limit. *Int J Sports Med*;26:675-81.
 79. Garcin M, Danel M, Billat V. (2008). Perceptual responses in free vs. constant pace exercise. *Int J Sports Med*;29:453-9.
 80. Celine CG, Monnier-Benoit P, Gros Lambert A, et al. (2011). The perceived exertion to regulate a training program in young women. *J Strength Cond Res*;25:220-4.
 81. Gros Lambert A, Mahon AD. (2006). Perceived exertion: influence of age and cognitive development. *Sports Med*;36:911-28.
 82. Garcin M, Coquart JB, Robin S, et al. (2011). Prediction of time to exhaustion in competitive cyclists from a perceptually based scale. *J Strength Cond Res*;25:1393-9.
 83. Garcin M, Mille-Hamard L, Billat V. (2004). Influence of aerobic fitness level on measured and estimated perceived exertion during exhausting runs. *Int J Sports Med*;25:270-7.
 84. Cabanac ME. (2006). Exertion and pleasure from an evolutionary perspective. In: *Acevedo EO, Ekkekakis P, editors. Psychobiology of physical activity. Champaign: Human Kinetics; p. 79-89.*
 85. Volkov NI, Shirkovets EA, Borilkevich VE. (1975). Assessment of aerobic and anaerobic capacity of athletes in treadmill running tests. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*;34:121-30.
 86. Conley DL, Krahenbuhl GS. (1980). Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc*;12:357-60.
 87. Leger LA, Boucher R. (1980). An indirect continuous running multi-stage field test: the Universite de Montreal track test. *Can J Appl Sport Sci*;5:77-84.
 88. Daniels J, Scardina N, Hayes J, et al. (1984). Elite and subelite female middle- and long-distance runners. In: *Landers DM, editor. Sport and elite performers: the 1984 Olympic scientific congress proceedings, vol. 3. Champaign: Human Kinetics; p. 57-72.*
 89. Billat LV, Koralsztein JP. (1996). Significance of the velocity at VO₂max and time to exhaustion at this velocity. *Sports Med*;22:90-108.
 90. Hill DW, Rowell AL. (1996). Running velocity at VO₂max. *Med Sci Sports Exerc*;28:114-9.
 91. di Prampero PE, Atchou G, Bruckner JC, et al. (1986). The energetics of endurance running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*;55:259-66.
 92. Lacour JR, Padilla-Magunacelaya S, Barthelemy JC, et al. (1990). The energetics of middle-distance running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*;60:38-43.
 93. Billat V, Renoux JC, Pinoteau J, et al. (1994). Reproducibility of running time to exhaustion at VO₂max in subelite runners. *Med Sci Sports Exerc*;26:254-7.
 94. Buchheit M. (2008). The 30-15 Intermittent fitness test: accuracy for individualizing interval training of young intermittent sport

- players. *J Strength Cond Res*;22:365-74.
95. Dupont G, Akakpo K, Berthoin S. (2004). The effect of in-season, high-intensity interval training in soccer players. *J Strength Cond Res*;18:584-9.
 96. Cazorla G, Benezzedine-Boussaidi L, Carre, F. (2005). Aptitude aerobique sur le terrain. *Pourquoi et comment l'évaluer? Medecins du Sport*;73:13-23.
 97. Mendez-Villanueva A, Buchheit M, Kuitunen S, et al. (2010). Is the relationship between sprinting and maximal aerobic speeds in young soccer players affected by maturation? *Ped Exerc Sci*;4:497-510.
 98. Buchheit M, Mendez-Villanueva A, Simpson BM, et al. (2010). Match running performance and fitness in youth soccer. *Int J Sports Med*;31:818-25.
 99. Noakes TD. (1988). Implications of exercise testing for prediction of athletic performance: a contemporary perspective. *Med Sci Sports Exerc*;20:319-30.
 100. Rampinini E, Bishop D, Marcora SM, et al. (2007). Validity of simple field tests as indicators of match-related physical performance in top-level professional soccer players. *Int J Sports Med*;28:228-35.
 101. Berthon P, Fellmann N, Bedu M, et al. (1997). A 5-min running field test as a measurement of maximal aerobic velocity. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*;3:233-8.
 102. Hill DW, Rowell AL. (1996). Significance of time to exhaustion during exercise at the velocity associated with VO₂max. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*;72:383-6.
 103. Midgley AW, McNaughton LR, Carroll S. (2007). Time at VO₂max during intermittent treadmill running: test protocol dependent or methodological artefact? *Int J Sports Med*;28:934-9.
 104. Harling SA, Tong RJ, Mickleborough TD. (2003). The oxygen uptake response running to exhaustion at peak treadmill speed. *Med Sci Sports Exerc*. 2003;35:663-8.
 105. Pugh LG. (1971). The influence of wind resistance in running and walking and the mechanical efficiency of work against horizontal or vertical forces. *J Physiol*;213:255-76.
 106. Saunders PU, Cox AJ, Hopkins WG, et al. (2010). Physiological measures tracking seasonal changes in peak running speed. *Int J Sports Physiol Perform*;5:230-8.
 107. Dabonneville M, Berthon P, Vaslin P, et al. (2003). The 5 min running field test: test and retest reliability on trained men and women. *Eur J Appl Physiol*;88:353-60.
 108. Berthon P, Fellmann N. (2002). General review of maximal aerobic velocity measurement at laboratory. *Proposition of a new simplified protocol for maximal aerobic velocity assessment*. *J Sports Med Phys Fitness*;42:257-66.
 109. Bosquet L, Leger L, Legros P. (2002). Methods to determine aerobic endurance. *Sports Med*;32:675-700.
 110. Blondel N, Berthoin S, Billat V, et al. (2001). Relationship between run times to exhaustion at 90, 100, 120, and 140% of vVO₂max and velocity expressed relatively to critical velocity and maximal velocity. *Int J Sports Med*;22:27-33.
 111. Bundle MW, Hoyt RW, Weyand PG. (2003). High-speed running performance: a new approach to assessment and prediction. *J Appl Physiol*;95:1955-62.
 112. Weyand PG, Bundle MW. (2005). Energetics of high-speed running: integrating classical theory and contemporary observations. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*;288:R956-65.
 113. Weyand PG, Lin JE, Bundle MW. (2006). Sprint performance-duration relationships are set by the fractional duration of external force application. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*;290:R758-65.
 114. Buchheit M. (2012). Repeated-sprint performance in team sport players: associations with measures of aerobic fitness, metabolic control and locomotor function. *Int J Sport Med*;33:230-9.
 115. Mendez-Villanueva A, Hamer P, Bishop D. (2008). Fatigue in repeated-sprint exercise is related to muscle power factors and reduced neuromuscular activity. *Eur J Appl Physiol*;103:411-9.
 116. Buchheit M. (2010). The 30-15 intermittent fitness test: 10 year review. *Myorobie J; 1 [online]. Available from URL: <http://www.martin-buchheit.net>. [Accessed 17 Feb 2013].*
 117. Dupont G, Blondel N, Lensele G, et al. (2002). velocity and time spent at a high level of VO₂ for short intermittent runs at supramaximal velocities. *Can J Appl Physiol*;27:103-15.
 118. Buchheit M. (2008). 30-15 Intermittent fitness test and repeated sprint ability. *Sci Sports*;23:26-8.
 119. Buchheit M, Al Haddad H, Lepretre PM, et al. (2009). Cardiorespiratory and cardiac autonomic responses to 30-15 intermittent fitness test. *J Strength Cond Res*;23:93-100.
 120. Bangsbo J, Iaia FM, Krstrup P. (2008). The Yo-Yo intermittent recovery test: a useful tool for evaluation of physical performance in intermittent sports. *Sports Med*;38:37-51.
 121. Dupont G, Defontaine M, Bosquet L, et al. (2010). Yo-Yo intermittent recovery test versus the Universite de Montreal Track Test: relation with a high-intensity intermittent exercise. *J Sci Med Sport*;13:146-50.
 122. Buchheit M. (2005). The 30-15 intermittent fitness test: reliability and implication for interval training of intermittent sport players [abstract no. 1231]. *10th European Congress of Sport Science; Jul 13-16; Belgrade*.
 123. Buchheit M, Laursen PB, Millet GP, et al. (2007). Predicting intermittent running performance: critical velocity versus endurance index. *Int J Sports Med*;29:307-15.
 124. Dellal A, Varliette C, Owen A, et al. (2012). Small-sided games vs. interval training in amateur soccer players: effects on the aerobic capacity and the ability to perform intermittent exercises with changes of direction. *J Strength Cond Res*;26:2712-20.
 125. Mosey T. (2009). High intensity interval training in youth soccer players: using fitness testing results practically. *J Aust Strength Cond*;17:49-51.
 126. Rakobowchuk M, Tanguay S, Burgomaster KA, et al. (2008). Sprint interval and traditional endurance training induce similar improvements in peripheral arterial stiffness and flow-mediated dilation in healthy humans. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*;295:R236-42.
 127. Demarie S, Koralsztein JP, Billat V. (2000). Time limit and time at VO₂max during a continuous and an intermittent run. *J Sports*

128. Millet GP, Candau R, Fattori P, et al. (2003). VO₂ responses to different intermittent runs at velocity associated with VO₂max. *Can J Appl Physiol*;28:410-23.
129. Dupont G, Blondel N, Berthoin S. (2003). Time spent at VO₂max: a methodological issue. *Int J Sports Med*;24:291-7.
130. Billat VL, Blondel N, Berthoin S. (1999). Determination of the velocity associated with the longest time to exhaustion at maximal oxygen uptake. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*;80:159-61.
131. Hill DW, Williams CS, Burt SE. (1997). Responses to exercise at 92% and 100% of the velocity associated with VO₂max. *Int J Sports Med*;18:325-9.
132. Billat V, Binsse V, Petit B, et al. (1998). High level runners are able to maintain a VO₂ steady-state below VO₂max in an all-out run over their critical velocity. *Arch Physiol Biochem*;106:38-45.
133. Gerbino A, Ward SA, Whipp BJ. (1996). Effects of prior exercise on pulmonary gas-exchange kinetics during high-intensity exercise in humans. *J Appl Physiol*;80:99-107.
134. Dorado C, Sanchis-Moysi J, Calbet JA. (2004). Effects of recovery mode on performance, O₂ uptake, and O₂ deficit during high-intensity intermittent exercise. *Can J Appl Physiol*;29:227-44.
135. Hill DW, Rowell AL. (1997). Responses to exercise at the velocity associated with VO₂max. *Med Sci Sports Exerc*;29:113-6.
136. Hill DW, Stevens EC. (2005). VO₂ response profiles in severe intensity exercise. *J Sports Med Phys Fitness*;45:239-47.
137. Laursen PB, Shing CM, Jenkins DG. (2004). aspects of the VO₂ response at the power output associated with VO₂ peak in well trained cyclists: implications for interval training prescription. *Res Q Exerc Sport*;75:423-8.
138. Billat LV, Renoux J, Pinoteau J, et al. (1994). Validation d'une epreuve maximale de temps limitea VMA (vitesse maximale aerobie) et a VO₂max. *Sci Sports*;9:3-12.
139. Hughson RL, O'Leary DD, Betik AC, et al. (2000). Kinetics of oxygen uptake at the onset of exercise near or above peak oxygen uptake. *J Appl Physiol*;88:1812-9.
140. Hill DW, Halcomb JN, Stevens EC. (2003). Oxygen uptake kinetics during severe intensity running and cycling. *Eur J Appl Physiol*;89:612-8.
141. Norris SR, Petersen SR. (1998). Effects of endurance training on transient oxygen uptake responses in cyclists. *J Sports Sci*;16:733-8.
142. Buchheit M, Abbiss C, Peiffer JJ, et al. (2012). Performance and physiological responses during a sprint interval training session: relationships with muscle oxygenation and pulmonary oxygen uptake kinetics. *Eur J Appl Physiol*;112(2):767-79.
143. Powers SK, Dodd S, Beadle RE. (1985). Oxygen uptake kinetics in trained athletes differing in VO₂max. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*;54:306-8.
144. Buchheit M, Laursen PB, Ahmaidi S. (2009). Effect of prior exercise on pulmonary O₂ uptake and estimated muscle capillary blood flow kinetics during moderate-intensity field running in men. *J Appl Physiol*;107:460-70.
145. Barstow TJ, Jones AM, Nguyen PH, et al. (1996). Influence of muscle fiber type and pedal frequency on oxygen uptake kinetics of heavy exercise. *J Appl Physiol*;81:1642-50.
146. Pringle JS, Doust JH, Carter H, et al. (2003). Oxygen uptake kinetics during moderate, heavy and severe intensity "submaximal" exercise in humans: the influence of muscle fibre type and capillarisation. *Eur J Appl Physiol*;89:289-300.
147. Kilding AE, Winter EM, Fysh M. (2006). A comparison of pulmonary oxygen uptake kinetics in middle- and long-distance runners. *Int J Sports Med*;27:419-26.
148. Billat V, Petit B, Koralsztein J. (1996). Calibration de la dure e des repetition d'une seance d'interval training a la vitesse associeea VO₂max en reference au temps limite continu: effet sur les reponses physiologiques et la distance parcourue. *Sci Mot*;28:13-20.
149. Smith TP, McNaughton LR, Marshall KJ. (1999). Effects of 4-wk training using Vmax/Tmax on VO₂max and performance in athletes. *Med Sci Sports Exerc*;31:892-6.
150. Smith TP, Coombes JS, Geraghty DP. (2003). Optimising high-intensity treadmill training using the running speed at maximal O₂ uptake and the time for which this can be maintained. *Eur J Appl Physiol*;89:337-43.
151. Buchheit M. (2012). High-intensity interval training: how to best shape the puzzle piece. *International congress of the Australian Strength and conditioning Association, November 9-11th, Brisbane, QS, Australia.*
152. Muller EA. (1953). The physiological basis of rest pauses in heavy work. *Q J Exp Physiol Cogn Med Sci*;38:205-15.
153. Belcastro AN, Bonen A. (1975). Lactic acid removal rates during controlled and uncontrolled recovery exercise. *J Appl Physiol*;39:932-6.
154. Ahmaidi S, Granier P, Taoutaou Z, et al. (1996). Effects of active recovery on plasma lactate and anaerobic power following repeated intensive exercise. *Med Sci Sports Exerc*;28:450-6.
155. Krstrup P, Mohr M, Steensberg A, et al. (2006). Muscle and blood metabolites during a soccer game: implications for sprint performance. *Med Sci Sports Exerc*;38:1165-74.
156. Gorostiaga EM, Asiain X, Izquierdo M, et al. (2010). Vertical jump performance and blood ammonia and lactate levels during typical training sessions in elite 400-m runners. *J Strength Cond Res*;24:1138-49.
157. Weltman A, Stamford BA, Fulco C. (1979). Recovery from maximal effort exercise: lactate disappearance and subsequent performance. *J Appl Physiol*;47:677-82.
158. Buchheit M, Cormie P, Abbiss CR, et al. (2009). Muscle deoxygenation during repeated sprint running: effect of active vs. passive recovery. *Int J Sports Med*;30:418-25.
159. Dupont G, Moalla W, Matran R, et al. (2007). Effect of short recovery intensities on the performance during two Wingate tests. *Med Sci Sports Exerc*;39:1170-6.
160. Spencer M, Bishop D, Dawson B, et al. (2006). Metabolism and performance in repeated cycle sprints: active versus passive recovery. *Med Sci Sports Exerc*;38:1492-9.
161. Bogdanis GC, Nevill ME, Lakomy HK, et al. (1996). Effects of active recovery on power output during repeated maximal sprint cycling. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*;74:461-9.

162. Connolly DAJ, Brennan KM, Lauzon CD. (2003). Effects of active versus passive recovery on power output during repeated bouts of short term, high intensity exercise. *J Sports Sci Med*;47-51.
163. Spencer M, Dawson B, Goodman C, et al. (2008). Performance and metabolism in repeated sprint exercise: effect of recovery intensity. *Eur J Appl Physiol*;103:545-52.
164. Thevenet D, Leclair E, (2008). Tardieu-Berger M, et al. *Influence of recovery intensity on time spent at maximal oxygen uptake during an intermittent session in young, endurance-trained athletes. J Sports Sci*;26:1313-21.
165. Acevedo EO, Goldfarb AH. (1989). Increased training intensity effects on plasma lactate, ventilatory threshold, and endurance. *Med Sci Sports Exerc*;21:563-8.
166. Simoneau JA, Lortie G, Boulay MR, et al. (1987). Effects of two high-intensity intermittent training programs interspaced by detraining on human skeletal muscle and performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*;56:516-21.
167. Wu HC, Hsu WH, Chen T. (2005). Complete recovery time after exhaustion in high-intensity work. *Ergonomics*;48:668-79.
168. Rowell LB, O'Leary DS. (1990). Reflex control of the circulation during exercise: chemoreflexes and mechanoreflexes. *J Appl Physiol*;69:407-18.
169. Billat V. (2005). L'entraînement en pleine nature: conseils de préparation aux sports outdoor. Paris: De Boeck; 2005.
170. Paavolainen L, Nummela A, Rusko H. (2000). Muscle power factors and VO₂max as determinants of horizontal and uphill running performance. *Scand J Med Sci Sports*;10:286-91.
171. Staab JS, Agnew JW, Siconolfi SF. (1992). Metabolic and performance responses to uphill and downhill running in distance runners. *Med Sci Sports Exerc*;24:124-7.
172. Pringle JS, Carter H, Doust JH, et al. (2002). Oxygen uptake kinetics during horizontal and uphill treadmill running in humans. *Eur J Appl Physiol*;88:163-9.
173. Slawinski J, Dorel S, Hug F, et al. (2008). Elite long sprint running: a comparison between incline and level training sessions. *Med Sci Sports Exerc*;40:1155-62.
174. Gajer B, Hanon C, Lehenaff D, et al. (2002). Analyse comparée de différentes séances de développement de VO₂max. In: *Expertise et sport de haut niveau: actes des Entretiens de l'INSEP Novembre 2002. Paris: Insep, 2003.*
175. Minetti AE, Moia C, Roi GS, et al. (2002). Energy cost of walking and running at extreme uphill and downhill slopes. *J Appl Physiol*;93:1039-46.
176. Seiler S, Jøranson K, Olesen BV, et al. (2013). Adaptations to aerobic interval training: interactive effects of exercise intensity and total work duration. *Scand J Med Sci Sports*;23(1):74-83.
177. Millet GP, Libicz S, Borrani F, et al. (2003). Effects of increased intensity of intermittent training in runners with differing VO₂ kinetics. *Eur J Appl Physiol*;90:50-7.
178. Tardieu-Berger M, Thevenet D, Zouhal H, et al. (2004). Effects of active recovery between series on performance during an intermittent exercise model in young endurance athletes. *Eur J Appl Physiol*;93:145-52.
179. Thevenet D, Tardieu M, Zouhal H, et al. (2007). Influence of exercise intensity on time spent at high percentage of maximal oxygen uptake during an intermittent session in young endurance-trained athletes. *Eur J Appl Physiol*;102:19-26.
180. Buchheit M, Millet GP, Parisy A, et al. (2008). Supramaximal training and post-exercise parasympathetic reactivation in adolescents. *Med Sci Sports Exerc*;40:362-71.
181. Bisciotti GN. (2004). L'incidenza fisiologica dei parametri di durata, intensità e recupero nell'ambito dell'allenamento intermittente. *Scienza di Sport: 90-6 [online]. Available from URL: <http://www.scienzaesport.com/SdS/050322074/074.htm>. [Accessed 17 Feb 2013].*
182. Dellal A, Keller D, Carling C, et al. (2010). Physiologic effects of directional changes in intermittent exercise in soccer players. *J Strength Cond Res*;24:3219-26.
183. Belfry GR, Paterson DH, Murias JM, et al. (2012). The effects of short recovery duration on VO₂ and muscle deoxygenation during intermittent exercise. *Eur J Appl Physiol*;112(5):1907-15.
184. Gastin PB. (2001). Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sports Med*;31:725-41.
185. Rozenek R, Funato K, Kubo J, et al. (2007). Physiological responses to interval training sessions at velocities associated with VO₂max. *J Strength Cond Res*;21:188-92.
186. Wakefield BR, Glaister M. (2009). Influence of work-interval intensity and duration on time spent at a high percentage of VO₂max during intermittent supramaximal exercise. *J Strength Cond Res*;23:2548-54.
187. Dupont G, Moalla W, Guinhouya C, et al. (2004). Passive versus active recovery during high-intensity intermittent exercises. *Med Sci Sports Exerc*;36:302-8.
188. Thevenet D, Tardieu-Berger M, Berthoin S, et al. (2007). Influence of recovery mode (passive vs. active) on time spent at maximal oxygen uptake during an intermittent session in young and endurance-trained athletes. *Eur J Appl Physiol*;99:133-42.
189. Dupont G, Blondel N, Berthoin S. (2003). Performance for short intermittent runs: active recovery vs. passive recovery. *Eur J Appl Physiol*;89:548-54.
190. Dupont G, Berthoin S. (2004). Time spent at a high percentage of VO₂max for short intermittent runs: active versus passive recovery. *Can J Appl Physiol*;29(Suppl):S3-16.
191. Girard O, Mendez-Villanueva A, Bishop D. (2011). Repeated-sprint ability—part I: factors contributing to fatigue. *Sports Med*;41:673-94.
192. Dupont G, Millet GP, Guinhouya C, et al. (2005). Relationship between oxygen uptake kinetics and performance in repeated running sprints. *Eur J Appl Physiol*;95:27-34.
193. Buchheit M. (2010). Performance and physiological responses to repeated-sprint and jump sequences. *Eur J Appl Physiol*;101:1007-18.
194. Buchheit M, Bishop D, Haydar B, et al. (2010). Physiological responses to shuttle repeated-sprint running. *Int J Sport Med*;31:402-9.
195. Balsom PD, Seger JY, Sjodin B, et al. (1992). Physiological responses to maximal intensity intermittent exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1992;65:144-9.

196. Bravo DF, Impellizzeri FM, Rampinini E, et al. (2008). Sprint vs. *interval training in football*. *Int J Sports Med*;29:668-74.
197. Buchheit M, Mendez-Villanueva A, Delhomel G, et al. (2010). Improving repeated sprint ability in young elite soccer players: repeated sprints vs. *explosive strength training*. *J Strength Cond Res*;24:2715-22.
198. Tabata I, Irisawa K, Kouzaki M, et al. (1997). Metabolic profile of high intensity intermittent exercises. *Med Sci Sports Exerc*;29:390-5.
199. Bogdanis GC, Nevill ME, Boobis LH, et al. (1996). Contribution of phosphocreatine and aerobic metabolism to energy supply during repeated sprint exercise. *J Appl Physiol*;80:876-84.
200. Parolin ML, Chesley A, Matsos MP, et al. (1999). Regulation of skeletal muscle glycogen phosphorylase and PDH during maximal intermittent exercise. *Am J Physiol*;277:E890-900.
201. Lepretre PM, Koralsztejn JP, Billat VL. (2004). Effect of exercise intensity on relationship between VO₂max and cardiac output. *Med Sci Sports Exerc*;36:1357-63.
202. McCole SD, Davis AM, Fueger PT. (2001). Is there a disassociation of maximal oxygen consumption and maximal cardiac output? *Med Sci Sports Exerc*;33:1265-9.
203. Gt Cooper. (1997). Basic determinants of myocardial hypertrophy: a review of molecular mechanisms. *Annu Rev Med*;48:13-23.
204. Gonzalez-Alonso J, Calbet JA. (2003). Reductions in systemic and skeletal muscle blood flow and oxygen delivery limit maximal aerobic capacity in humans. *Circulation*;107:824-30.
205. Gonzalez-Alonso J. (2008). Point: stroke volume does/does not decline during exercise at maximal effort in healthy individuals. *J Appl Physiol*;104:275-6; discussion 9-80.
206. Warburton DE, Gledhill N. (2008). Counterpoint: Stroke volume does not decline during exercise at maximal effort in healthy individuals. *J Appl Physiol*;104:276-8; discussion 8-9.
207. Coyle EF, Trinity JD. (2008). The stroke volume response during or throughout 4-8 min of constant-power exercise that elicits VO₂max. *J Appl Physiol*;104:282-3; author reply 4-5.
208. Lepretre PM, Foster C, Koralsztejn JP, et al. (2005). Heart rate deflection point as a strategy to defend stroke volume during incremental exercise. *J Appl Physiol*;98:1660-5.
209. Cumming GR. (1972). Stroke volume during recovery from supine bicycle exercise. *J Appl Physiol*;32:575-8.
210. Astrand PO, Rodhal K, editors. (2003). Textbook of work physiology: physiological bases of exercise. *Series in Health Education, Physical Education, and Recreation. Lower Mitcham (SA). Human Kinetics. New York: MacGraw-Hill. p. 649.*
211. Fox EL, Mathews DK. (1974). Interval training: conditioning for sports and general fitness. *Orlando (FL): Saunders College Publishing; 1974.*
212. Takahashi T, Okada A, Saitoh T, et al. (2000). Difference in human cardiovascular response between upright and supine recovery from upright cycle exercise. *Eur J Appl Physiol*;81:233-9.
213. Charloux A, Lonsdorfer-Wolf E, Richard R, et al. (2000). A new impedance cardiograph device for the non-invasive evaluation of cardiac output at rest and during exercise: comparison with the "direct" Fick method. *Eur J Appl Physiol*;82:313-20.
214. Richard R, Lonsdorfer-Wolf E, Charloux A, et al. (2001). Non-invasive cardiac output evaluation during a maximal progressive exercise test, using a new impedance cardiograph device. *Eur J Appl Physiol*;85:202-7.
215. Fontana P, Betschon K, Boutellier U, et al. (2011). Cardiac output but not stroke volume is similar in a Wingate and VO₂ peak test in young men. *Eur J Appl Physiol*;111:155-8.
216. Helgerud J, Engen LC, Wisloff U, et al. (2001). Aerobic endurance training improves soccer performance. *Med Sci Sports Exerc*;33:1925-31.
217. Sunderland C, Morris JG, Nevill ME. (2008). A heat acclimation protocol for team sports. *Br J Sports Med*;42:327-33.
218. Castagna C, Impellizzeri FM, Chaouachi A, et al. (2011). Effect of training intensity distribution on aerobic fitness variables in elite soccer players: a case study. *J Strength Cond Res*;25:66-71.
219. Mooney M, O'Brien B, Cormack S, et al. (2011). The relationship between physical capacity and match performance in elite Australian football: a mediation approach. *J Sci Med Sport*;14:447-52.
220. Buchheit M, Simpson BM, Mendez-Villanueva A. (2012). Repeated high-speed activities during youth soccer games in relation to changes in maximal sprinting and aerobic speeds. *Int J Sport Med*;34:40-8.
221. Buchheit M, Rabbani A. (2014). 30-15 Intermittent Fitness Test vs. *Yo-Yo Intermittent Recovery Test Level 1: relationship and sensitivity to training*. *Int J Sports Physiol Perform*;9(3):522-4.
222. Armstrong N, Barker AR. (2009). Oxygen uptake kinetics in children and adolescents: a review. *Pediatr Exerc Sci*;21:130-47.