

PREDICCIÓN DE LA CAPACIDAD AERÓBICA A TRAVÉS DE PRUEBAS DE MODERADA INTENSIDAD: FRECUENCIA CARDÍACA DE RECUPERACIÓN Y CONSUMO MÁXIMO DE OXÍGENO

Vásquez-Gómez, J. (jaime.vasquez@uss.cl)

Facultad de Ciencias de la Actividad Física, Universidad San Sebastián, Concepción (Chile).

Recibido: Septiembre, 2013; Aceptado: Diciembre, 2013.

RESUMEN

Para prescribir y evaluar la intensidad del ejercicio aeróbico se ha utilizado porcentajes de la frecuencia cardíaca (FC), del consumo máximo de oxígeno (VO_2 máx.), concentraciones de lactato en sangre, el índice de esfuerzo percibido, entre otros. Estos parámetros fisiológicos guardan una cierta relación pudiéndose utilizar uno de ellos o una amalgama de los mismos. La relación que tiene la FC con el consumo de oxígeno (VO_2) se ha establecido desde hace bastante tiempo en el ejercicio aeróbico de esfuerzo submáximo (SM) y máximo, señalándose porcentajes similares entre ellos. El indicador por excelencia del ejercicio aeróbico es el VO_2 máx. y su predicción no solo puede realizarse por medio de un porcentaje de la FC, también a través de la frecuencia cardíaca de recuperación (FCR) post-ejercicio SM. Esta forma de predicción se ha utilizado en protocolos de algunos test validados y expuestos en la literatura. En esta revisión bibliográfica se darán a conocer una serie de investigaciones que han demostrado la relación entre la FCR y el VO_2 máx. En el artículo se expone el comportamiento de la FC y del VO_2 durante el ejercicio aeróbico, así como el comportamiento de la FC en la recuperación. Luego se muestra la relación que tienen ambos parámetros fisiológicos durante y post-ejercicio aeróbico para posteriormente describir algunos test que predicen el VO_2 máx. a partir de la FCR. Se concluye que la FCR post-ejercicio SM es un indicador válido para estimar el VO_2 máx., y que estos parámetros son inversamente proporcionales. **PALABRAS CLAVE:** test submáximo; frecuencia cardíaca; recuperación; VO_2 máx.; relación.

ABSTRACT

Percentages of heart rate (HR), maximal oxygen consumption (VO_2 max), blood lactate concentrations and rate of perceived exertion, have been used to prescribe and evaluate the intensity of aerobic activity, among others. Due to the degree of relatedness among these physiological parameters it is possible to combine them. The relationship between HR and oxygen consumption (VO_2) has been established for quite some time in submaximal (SM) and maximal aerobic exercises, indicating similar rates between them. The ultimate indicator of aerobic exercise is the VO_2 max and its prediction can be performed not only by a percentage of the HR, also through heart rate recovery (HRR) after performing a submaximal-type exercise. This type prediction has been used in certain test protocols which have been shown and validated in literature. In this literature review will be announced a series of investigations that have shown the relationship between HRR and VO_2 max. The article exposes the behavior of HR and VO_2 during aerobic activities, as well as the behavior of HRR. We discuss about the relationship they during and after aerobic exercise and some HRR time tests used to predict VO_2 max are analyzed as well. We conclude that HRR after SM exercise is a valid indicator to estimate the

VO₂ max, and that these parameters are inversely proportional. **KEYWORDS:** submaximal test; heart rate; recovery; VO₂ max.; relation.

INTRODUCCIÓN

Frecuencia Cardíaca en Ejercicio Submáximo y Máximo

Comportamiento de la Frecuencia Cardíaca en Fase de Ejercicio

Todo ejercicio físico requiere de ajustes en la función cardiovascular con el objetivo de lograr una homeostasis circulatoria. La modulación de la respuesta de la FC y sus cambios va a depender del sistema nervioso autónomo parasimpático a través de la inhibición o excitación de las vías eferentes por medio del nervio vago, y por el sistema autónomo simpático (Freeman, 2006 en Leite et al. 2010).

Un método no invasivo para mensurar la respuesta autónoma del sistema nervioso es el comportamiento de la FC (Baumert, 2006; Kiviniemi, 2007; Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology, 1996 en Lamberts et al. 2009). En el inicio del ejercicio la cinética de la FC es más lenta pudiéndose atribuir esto a una escasa intervención del sistema parasimpático (Hughson y Morrissey, 1983 en Xu y Rhodes, 1999), pues en la transición desde el reposo al ejercicio existe una disminución en algunos parámetros del comportamiento de la FC (Casadei, 1995; Yamamoto, 1991 en Achten y Jeukendrup, 2003), ya sea en términos absolutos (Amara y Wolfe, 1997; Casadei, 1995; Gregoire, 1996; Perini, 1993 en Achten y Jeukendrup, 2003) y en su transformación logarítmica (Arai, 1989; Breuer, 1993; González, 2000; Kamath y Fallan, 1993; Perini, 1993; Yamamoto, 1991 en Achten y Jeukendrup, 2003) que demuestra que la acción del sistema parasimpático disminuye (Achten y Jeukendrup, 2003). Se ha indicado que la actividad vagal está presente en el estado de reposo antes de comenzar el ejercicio, pero no está presente la actividad autónoma simpática, sin embargo se ha demostrado que el tono parasimpático predomina en estado de reposo (Polanczyk, 1998 en Borresen y Lambert, 2008) y que el aumento en el ritmo de la FC al comenzar el ejercicio se debe a la disminución de la actividad parasimpática. A medida que aumenta la intensidad del ejercicio la taquicardia que se presenta es producto del aumento de la actividad simpática y de la disminución de la actividad parasimpática (Nakamura, 1993; Robinson, 1996; Yamamoto, 1991 en Borresen y Lambert, 2008). El comportamiento de la FC se ha determinado generalmente sobre el control autónomo del ritmo cardíaco en estado de reposo (Martinmäki et al. 2008). No obstante, se ha elaborado un análisis de estos parámetros en estado no estacionario para verificar los cambios transitorios de la FC (Kaikkonen, 2007; Martinmäki, 2006b; Martinmäki y Rusko, 2008; Pichon, 2004 en Martinmäki et al. 2008).

Una de las aplicaciones más importantes de la FC como indicador de la intensidad ha sido durante el ejercicio SM (Robergs y Landwehr, 2002). Se ha propuesto que una intensidad liviana de ejercicio estaría bajo el 75% de la FC máxima, el ejercicio de intensidad moderada entre el 75 y el 85% y la intensidad pesada entre el 85 y 90% de la misma (Wilmore y Costill, 1994 en Zaletel, Furjan-mandic y Zagorc, 2009). Por su parte, en un estudio elaborado por Barak et al. (2010) se eligió una intensidad del 80% de la FC pico para aplicar una carga de ejercicio SM en cicloergómetro. También se ha indicado que la variación de la FC durante un ejercicio SM parece estar entre 3 y 6 pulsaciones por minuto (Arts y Kuipers, 1994; Brisswalter y Legros, 1994; Lambert, 1998 en Lamberts et al. 2004).

A altas intensidades la FC coincide con la acumulación de lactato en sangre, lo que es usado para establecer zonas de intensidad (Arkinstall, 2001; Halson, 2002 en Achten y Jeukendrup, 2003). Se ha propuesto un método indirecto para determinar el umbral anaeróbico sólo basándose en la FC

(Conconi, 1982 en Achten y Jeukendrup, 2003) en el cual se ha encontrado una relación lineal entre la FC y la velocidad de carrera a intensidades submáximas pero una meseta estable a altas intensidades de carrera, reportándose un punto de inflexión en la relación velocidad de carrera – FC, al mismo tiempo que el umbral anaeróbico.

Frecuencia Cardíaca en Fase de Recuperación

Las pruebas de subir y bajar escalones sirven para verificar la FC durante el esfuerzo y la recuperación de la misma post-ejercicio, la cual es un indicador del estado cardiopulmonar. De manera que cuando la FCR es más rápida en volver al estado de reposo mejor es el estado cardiopulmonar (Chen, 2005; Chien, 2000 en Chen et al. 2006). Se supone que la FCR es más rápida cuando la condición aeróbica del sujeto es mejor, por lo tanto el porcentaje de la misma aumentaría cuando se eleve el nivel de condición física (Dennis y Noakes, 1998 en Lamberts et al. 2004). Así, la FC se recupera más rápido en sujetos entrenados que en sujetos no entrenados luego de realizar ejercicio a intensidades similares (Bunc, 1988; Short y Sedlok, 1997 en Lamberts et al. 2009).

Se ha establecido un decaimiento exponencial para graficar la respuesta de la FC post-ejercicio la cual expresa claramente el comportamiento de dicha curva tras el esfuerzo SM, ya que el sistema parasimpático desencadenaría esta curva exponencial (Pierpont, 2000 en Borresen y Lambert, 2008). La FCR post-ejercicio es controlada por medio de interacciones complejas entre variables neurales y humorales (Buchheit, 2007b en Buchheit et al. 2010), pudiendo ser el factor más determinante en la recuperación de este parámetro fisiológico la reactivación del sistema parasimpático (Buchheit, 2007b; Imai, 1994 en Buchheit et al. 2010) junto con la disminución en la actividad del sistema simpático (Kannankeril, 2004; Savin, 1982 en Buchheit et al. 2010). Borresen y Lambert (2008) reafirman que la recuperación de la FC post-ejercicio se basa en una relación entre el sistema nervioso simpático y parasimpático. Por otro lado, se ha indicado que algunos metabolitos resultantes del esfuerzo físico como las catecolaminas, fosfatos inorgánicos o el lactato podrían estimular la actividad simpática por medio de un control quimiorreflejo de la FCR (Vissing, 2000; Kaufman y Hayes, 2002 en Buchheit et al. 2010).

Se ha postulado que la disminución del tono simpático contribuye más en la recuperación de la FC, postergando para más tarde a la actividad parasimpática con un papel más predominante (Savin, 1982 en Borresen y Lambert, 2008). En cambio hay otras referencias que señalan que existe una interacción entre los dos sistemas, actuando más rápido el sistema parasimpático ocupando un rol importante al comienzo de la fase de recuperación de la FC provocando una desaceleración de la misma (Javorka, 2002; Kannankeril y Goldberger, 2002; Kannankeril, 2004; Pierpont, 2000 en Borresen y Lambert, 2008). Esto se reafirma en otro estudio en donde se indica que el sistema parasimpático actúa rápidamente en el primer minuto de recuperación, e inclusive aumentó hasta los 4 minutos y se mantuvo en estado constante hasta los 10 minutos (Kannankeril y Goldberger, 2002; Kannankeril, 2004 en Borresen y Lambert, 2008). En definitiva el control cardiovascular es regulado por diferentes aferencias sensitivas tanto musculares como arteriales (Rowell y O’Leary, 1990 en Buchheit et al. 2010).

Por otra parte, la comparación entre géneros sobre la recuperación del ritmo cardíaco ha sido distinta a intensidad absoluta y similar a intensidad relativa en el ejercicio SM observado en niños y niñas, por lo tanto es importante controlar la intensidad del ejercicio para medir con mayor precisión la FC durante la recuperación (Mahon, 2003 en Borresen y Lambert, 2008). A diferencia de los niños y las niñas, un estudio ha señalado que la FCR luego de 1 y 2 minutos de terminar el esfuerzo ha sido mayor en hombres que en mujeres (Arena et al. 2010). Por otra parte, se ha propuesto que la recuperación del

ritmo cardíaco en el ejercicio SM es más rápida en comparación con el ejercicio de carácter máximo en individuos sanos, pues esto se atribuye a que el sistema simpático se activa en menor medida durante el ejercicio SM (Kannankeril, 2004 en Borresen y Lambert, 2008). Para medir la recuperación del ritmo cardíaco se ha indicado como medio óptimo utilizar una prueba de esfuerzo SM estandarizada con el fin de verificar la respuesta a los entrenamientos (Borresen y Lambert, 2008).

La FCR puede llegar a valores de reposo post-ejercicio en una actividad de corta duración y de baja intensidad dentro de 5 minutos (Seiler, 2007; Terziotti, 2001 en Barak et al. 2010). Esta recuperación de la FC depende de la intensidad del ejercicio y de la modalidad (Gladwell, 2010; Kaikkonen, 2008 en Barak et al. 2010). En este sentido se ha diseñado un protocolo de carrera incremental en 20 metros con 4 estadios de 2 minutos y con pausas de recuperación entre ellos de 1 minuto, en las cuales los sujetos se mantienen de pie en forma estacionaria, con el fin de verificar la frecuencia durante todo el test y en la recuperación durante 1 minuto luego de haber terminado el estadio número 4 (Lamberts, 2004 en Borresen y Lambert, 2008).

Se ha demostrado que influye en la recuperación de la FC la posición del cuerpo (Barak et al. 2010). Así, se ha reportado un retraso en la actividad vagal tras ejecutar ejercicio independientemente si fue en posición vertical o en posición supina (Takahashi, 2000 en Barak et al. 2010). Sin embargo, se ha encontrado que la recuperación en el comportamiento de la FC fue moderadamente afectada por la posición del cuerpo en el ejercicio (Buchheit, 2009 en Barak et al. 2010). La recuperación según la posición del cuerpo en el esfuerzo puede prescribir la recuperación de la FC post-ejercicio SM (Barak et al. 2010). El ejercicio de alta intensidad provoca una reactivación vagal acompañada de otros fenómenos produciendo que la FC no llegue a valores de reposo luego de 10 minutos (Arai, 1989; Pober, 2004; Takahashi, 2000 en Barak et al. 2010), luego de 15 minutos (Gladwell, 2010; Mourot, 2004; Pober, 2004; Terziotti, 2001 en Barak et al. 2010), luego de 30 minutos (Javorka, 2002 en Barak et al. 2010) e inclusive luego de una hora (Furlan, 1993; James, 2002; Mourot, 2004; Terziotti, 2001 en Barak et al. 2010).

Se ha demostrado que la recuperación de la FC en 15 minutos tras realizar un ejercicio SM al 50 y al 80% del umbral anaeróbico, que el sistema cardiovascular se vio alterado y el tono del nervio vago no se recuperó completamente (Terziotti, 2001 en Barak et al. 2010). Esto se reafirma en el estudio de Barak et al. (2010) en donde encuentran que después del ejercicio SM hubo un retraso de la actividad vagal y en algunos parámetros del comportamiento de la FC independiente de las posiciones del cuerpo en el ejercicio. El descenso en el comportamiento de la FC post-ejercicio puede deberse a efectos hormonales sobre la modulación vagal (Miyamoto, 2003 en Barak et al. 2010). Después de realizar un ejercicio en posición vertical cae el gasto cardíaco y la presión arterial, lo que puede restablecerse por medio de una mayor acción del sistema simpático (Bradley y Davi, 2003; Westerhof, 2006 en Barak et al. 2010). Finalmente, Barak et al. (2010) en su estudio sugieren que luego de 15 minutos de realizar ejercicio SM los valores de FC no regresan a valores previos al ejercicio independiente de la posición del cuerpo en la ejecución del mismo. Plantean además, que aún no se conoce con claridad cuál es la posición del cuerpo más favorable para acelerar la recuperación de la regulación autonómica cardíaca.

Consumo de Oxígeno en el Ejercicio Submáximo y Máximo

Cinética del Consumo de Oxígeno en el Ejercicio Submáximo y Máximo

La cinética del VO_2 es muy similar a la de la fosfocreatina al inicio del ejercicio (Rossiter, 2002 en Lai et al. 2007). Se ha planteado que en personas jóvenes al ocurrir más rápido el fenómeno de la

aceleración de la cinética del VO_2 pulmonar, el esfuerzo no requiere de una producción de energía anaeróbica aportada por la fofofocreatina en el ejercicio SM (Stathokostas et al. 2009).

Se ha sugerido que en el ejercicio SM de ciclismo a intensidades bajas de 50, 55 y 100 vatios el VO_2 alcanza un valor de estado estable a los 3 minutos de ejercicio, pero al aumentar el esfuerzo hasta los 6 minutos a intensidades de 125, 150 y 175 vatios no se obtiene un estado estacionario (Barstow y Molé, 1991; Whipp y Wassermant, 1972 en Noordhof, Koning y Foster, 2010). Ante esto, la respuesta del VO_2 en relación a la intensidad del ejercicio se puede establecer en diferentes áreas. El área de esfuerzo moderado es aquella que no genera una acumulación de lactato significativo, donde su límite superior va a estar marcado por el umbral de lactato o umbral anaeróbico (Gaesser y Poole, 1996; Whipp, 1987 en Xu y Rhodes, 1999). La cinética del transporte de oxígeno desde el reposo hasta el 40% del umbral de lactato ha sido más rápida que entre el 40 y 80% del umbral de lactato, por lo tanto no tendría un incremento lineal con la carga en el ejercicio (Hughson y Morrissey, 1982 en Xu y Rhodes, 1999). La cinética del VO_2 más lenta entre el 40 y 80% del umbral de lactato se explicaría por una FC más baja ya que el volumen sistólico alcanza su máximo entre el 40 y el 50% del VO_2 máx., por lo tanto el gasto cardíaco sería menor (Hughson y Morrissey, 1983 en Xu y Rhodes, 1999).

En el ejercicio de baja intensidad se puede observar una tasa constante en el VO_2 y un menor déficit de oxígeno que abarca desde el reposo hasta el estado de equilibrio, y un menor índice de esfuerzo percibido (Carmouche, Bubein y Kay, 1998). En una primera fase del ejercicio continuo de intensidad moderada el VO_2 tiene un rápido aumento, este aumento se completa entre los primeros 15 a 25 segundos aproximadamente. Esta fase se aprecia mejor sobre todo cuando el ejercicio comienza desde un estado de reposo equivalente a una carga de 0 vatios (Whipp, 1987 en Xu y Rhodes, 1999). El aumento del VO_2 se produce por el gasto cardíaco y por el flujo sanguíneo pulmonar (Krogh y Lindhard, 1913; Linnarsson, 1974; Whipp, 1987 en Xu y Rhodes, 1999), por lo mismo ante un cambio en el oxígeno venoso del músculo no llegaría a los pulmones en tan corto tiempo, de manera que no afectaría esta fase de la cinética del VO_2 . Sin embargo esto es contradictorio, pues se ha demostrado que el oxígeno venoso mixto disminuyó antes de este tiempo previsto (Casaburi, 1989 en Xu y Rhodes, 1999). Por otra parte, se ha concluido en un estudio que la cinética del VO_2 en esta primera fase no está limitada por el aporte de oxígeno a la musculatura activa en un ejercicio en bicicleta (Grassi, 1996 en Xu y Rhodes, 1999). Asimismo, se ha indicado que el transporte de oxígeno no es un factor determinante en la cinética del VO_2 en el inicio de un ejercicio de esfuerzo moderado en sujetos normales, pues se puede compensar la disminución del flujo sanguíneo con un aumento del gasto cardíaco o con la extracción de oxígeno (Williamson, 1996 en Xu y Rhodes, 1999). También se ha demostrado que un aumento de la perfusión a las piernas a través de un ejercicio intenso no ha cambiado la cinética del VO_2 en la primera fase durante un ejercicio de intensidad moderada ejecutado posteriormente (Gerbino, 1996; MacDonald, 1997 en Xu y Rhodes, 1999).

En una segunda fase comienzan a ocurrir cambios metabólicos que dan lugar un estado estacionario del VO_2 , por lo tanto se ha establecido una relación lineal entre la cinética del VO_2 y el ritmo de trabajo (Barstow, 1993; Whipp, 1987; Whipp, 1982; Whipp y Ward, 1990 en Xu y Rhodes, 1999). Pareciera ser que en los primeros instantes de la fase dos la capacidad oxidativa de la musculatura no afecta en la mejora de la cinética del VO_2 (Xu y Rhodes, 1999). Para graficar que se ha alcanzado el VO_2 en estado estable este se puede expresar como una función exponencial (Whipp y Wasserman, 1972 en Carmouche et al. 1998), la cual se establece a una intensidad por debajo del umbral ventilatorio (Whipp, 1982 en Yoshida, Abe, Fukuoka y Hughson, 2008), es decir, con un incremento más rápido en los primeros instantes para luego representar una meseta. Este es un modelo único exponencial que se ha reportado en varios estudios realizados en niños y adultos (Hebestreit, 1998; Ozyener, 2001; Whipp

y Rossiter, 2005; Whipp y Wasserman, 1972; Whipp, 1982 en Lai et al. 2007). Por otro lado, aún no se establece un acuerdo si los mecanismos que están implicados en esta segunda fase de la cinética del VO_2 se relacionan de manera lineal con la intensidad de trabajo desde el reposo hasta alcanzar el VO_2 máx. Para cuantificar estos factores limitantes de la cinética del VO_2 son necesarios modelos matemáticos de la biofísica que describan el transporte de oxígeno en diferentes intensidades de ejercicio (Lai et al. 2007). Esta idea se ha propuesto en otros estudios recientes (Korzeniewski y Zoladz, 2004; Lai, 2006, 2007 en Lai et al. 2007). Por su parte, en el ejercicio de alta intensidad existe un componente lento del VO_2 que se presenta en esta segunda fase (Whipp, 1994; Barstow, 1994; Gaesser, 1996; Barstow, 1991 en Xu y Rhodes, 1999). Este componente lento retrasa el apareamiento del estado estacionario (Poole, 1988; Roston, 1987 en Xu y Rhodes, 1999) y está muy relacionado con el inicio de la acumulación de lactato (Whipp, 1987; Whipp, 1990; Paterson, 1991; Poole, 1988; Roston, 1987; Casaburi, 1989 en Xu y Rhodes, 1999). Este componente lento del VO_2 se expresa en la diferencia del VO_2 al sexto minuto de ejercicio (o hasta su término) y a los tres minutos (Whipp, 1972 en Xu y Rhodes, 1999). El VO_2 no se estabiliza durante el ejercicio severo y aumenta hasta el punto de fatiga (Gaesser, 1996; Poole, 1988; Roston, 1987, Casaburi, 1989 en Xu y Rhodes, 1999). El componente lento de esta fase es mayor que en el ejercicio de alta intensidad, pues se ha reportado un valor mayor a 1 litro/minuto (Whipp, 1987; Whipp, 1990; Roston, 1987 en Xu y Rhodes, 1999). Por lo general los sujetos con menos porcentaje de fibras oxidativas tienen una mayor amplitud del componente lento del VO_2 durante el ejercicio de intensidad pesada (Barstow, 1996; Pringle, 2003 en Lai et al. 2007).

En la tercera fase existe un estado de equilibrio en el VO_2 durante el ejercicio SM, la que se alcanza luego de 3 minutos aproximadamente (Barstow, 1994; Gaesser y Poole, 1996; Whipp, 1987 en Xu y Rhodes, 1999) o en menos de 3 minutos (Xu y Rhodes, 1999), obteniéndose una ganancia de 9 a 11 ml de oxígeno/vatios/minuto durante el ejercicio de intensidad moderada (Barstow, 1993; Gaesse y Poole, 1996; Whipp, 1987; Whipp y Ward, 1990 en Xu y Rhodes, 1999). De manera similar, el VO_2 en estado estacionario se ha calculado en un tiempo entre 4 y 6 minutos en una prueba en cinta rodante a una intensidad moderada y constante en sujetos adultos (Kay, 1995 en Carmouche et al. 1998).

Frecuencia Cardíaca y Consumo de Oxígeno

Relación entre Frecuencia Cardíaca y Consumo de Oxígeno

Aunque no hay establecida una regla de oro para la prescripción de la intensidad en el entrenamiento, generalmente se utiliza la FC, el VO_2 máx., el lactato y el índice de esfuerzo percibido (Kaikkonen, 2010 en Barak et al. 2010). De manera similar, se ha encontrado que la predicción del VO_2 máx. se ha realizado en función de indicadores como la FC y el índice de esfuerzo percibido en ejercicio SM (Davies, 2008; Eston, 2008; Faff, 2007; Klusiewicz, 2004 en Klusiewicz et al. 2011). Así, la FC tiene una estrecha relación con el índice de esfuerzo percibido y el VO_2 máx. como marcadores de intensidad en el ejercicio (Lambrick et al. 2009).

Se debe tener en cuenta que la relación entre el VO_2 máx. y la FC responde al tipo de ejercicio, masa muscular involucrada, la posición del cuerpo, intensidad del ejercicio, el ambiente, etc. (Darby y Marsh, 2007). La FC tiene una relación lineal con el gasto energético durante el estado de equilibrio en ejercicio y también una estrecha relación con el VO_2 máx. (Lubans et al. 2009). Cuando la FC y el VO_2 se expresan en porcentajes en relación a su máximo no se advierte diferencias en la pendiente de la curva en sujetos altamente entrenados, moderadamente entrenados y no entrenados (Londeree y Ames, 1976 en Achten y Jeukendrup, 2003).

VO ₂ máx. %	FC máx. %
40	63
50	79
60	76
70	82
80	89
90	95

Figura 1. Relación porcentual entre consumo de oxígeno y frecuencia cardíaca (Fuente: Robergs y Landwehr, 2002 p. 2).

En un estudio realizado por Keytel et al. (2005) se estableció que el 35, 62 y 80% del VO₂ máx. se correspondía con el 57, 77 y 90% de la FC máxima para un grupo de sujetos que completaron una prueba en estado estable en cinta rodante o en cicloergómetro. También se ha reportado que la FC podría ser un buen indicador de la intensidad del ejercicio cuando el esfuerzo sea de carácter moderado cercano al 50% del VO₂ máx. (Berry, 1992 en Zaletel et al. 2009).

En el ejercicio de corta duración y en estado estacionario existe una relación lineal entre la FC, el VO₂ máx. y la intensidad del ejercicio (Arts y Kuipers, 1994 en Lamberts et al. 2004). Asimismo, en el ejercicio de intensidad moderada existe una relación lineal entre la FC y el VO₂ máx. lo cual está sujeto a las diferencias individuales de las personas (Keytel et al. 2005).

En algunos casos la utilización de la FC para la predicción del VO₂ máx. en ejercicio SM puede tener errores, como se ha encontrado en el protocolo YMCA (Robergs y Landwehr, 2002). Por su parte, el VO₂ máx. podría predecir la FC submáxima posiblemente por la relación lineal que existe entre estos parámetros o la variación de la FC día a día (McArdle, 1986 en Buono et al. 1991).

Los objetivos de este trabajo son demostrar la relación entre la FCR y el VO₂ máx., y aportar evidencia científica sobre la FCR post-ejercicio SM y su validez para predecir el VO₂ máx.

MÉTODOS

El diseño de investigación se enmarca en una revisión bibliográfica en la base de datos EBSCO en el índice SPORTDiscus.

De la base de datos se ha revisado sólo textos completos con un total de 30 artículos entre los años 1991 y 2011. Entre las revistas científicas revisadas se encuentra Sport Medicine, International Journal of Sport Nutrition and Exercise and Metabolism, Journal of Sport Sciences y European Journal of Applied Physiology que cuentan con altos índices de impacto (Thomas y Nelson, 2007), entre otras.

PREDICCIÓN DEL CONSUMO MÁXIMO DE OXÍGENO A TRAVÉS DE LA FRECUENCIA CARDÍACA DE RECUPERACIÓN EN TEST SUBMÁXIMOS

Predecir el VO₂ máx. a partir de la FC en un ejercicio SM se ha considerado como una fuente importante de error de estimación (Robergs y Landwehr, 2002 en Karavirta et al. 2008). Sin embargo, se ha reportado que la FC tiene una buena relación con el VO₂ máx. al ejecutar una prueba en escalón con formas de movimiento variadas, además se ha indicado que el VO₂ máx. en una prueba en banco ergométrico y en cinta rodante ha sido similar (Darby y Marsh, 2007). También se ha observado que el

VO₂ aparece a un mínimo de 20 – 25 pasos por minuto en una prueba en banco ergométrico (Souza y Pellegrinotti, 2002 en Souza et al. 2007). Por otra parte la predicción del VO₂ máx. a partir de la FC obtenida en un test SM se ha realizado por medio de un nomograma (Åstrand y Rhyming, 1954 en Achten y Jeukendrup, 2003). En este nomograma se puede notar que a menor FCR, en el test del escalón y en la prueba en cicloergómetro, el VO₂ máx. será mayor y viceversa en hombres y mujeres (Figura 2).

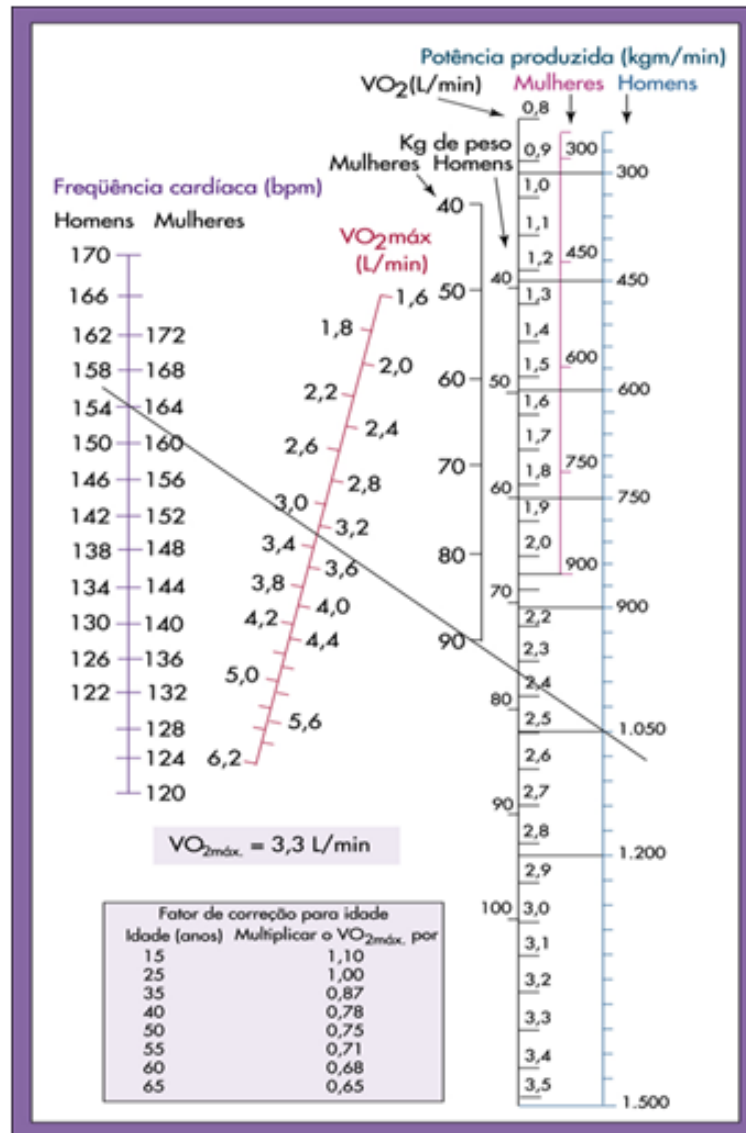


Figura 2. Nomograma de Åstrand.

De forma similar, se ha indicado que es posible calcular el VO₂ máx. por medio de la FC obtenida al finalizar la prueba de esfuerzo SM en escalón utilizando una ecuación de regresión, tanto para niñas como para niños (Lubans et al. 2008). En este sentido Chatterjee, Chatterjee y Bandyopadhyay (2005) encuentran una relación inversa entre la FCR obtenida en el test del escalón de McArdle y el VO₂ máx. medido de forma directa en una muestra de 40 mujeres sedentarias, pues a menor FCR se observa un mayor VO₂ y a la inversa (Figura 3).

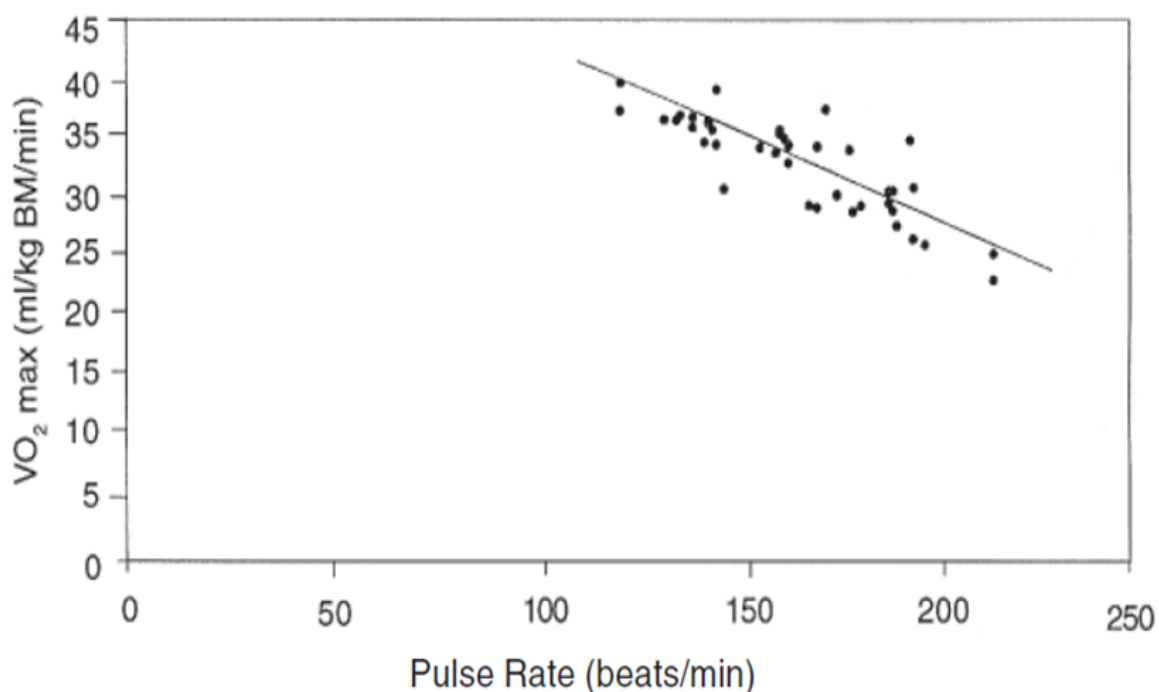


Figura 3. Relación entre frecuencia cardíaca de recuperación y VO₂ máx. La ecuación para predecir el consumo máximo de oxígeno en ml/kg/min es $y = 54,12 - 0,13x$ (Chatterjee et al. 2005 p. 3).

Se han desarrollado múltiples ecuaciones para estimar el VO₂ máx. a través de pruebas de esfuerzo SM en cinta rodante, cicloergómetros y escalones ergométricos (Åstrand y Rhyming, 1954; Brouha, 1943; Montoye, 1986; Siconolfi, 1985; Sjöstrand, 1947 en Ainsworth, McMurray y Veazey, 1997). En la década de 1990 también se han desarrollado algunas ecuaciones de predicción (Ainsworth, 1992; Heild, 1995; Jackson, 1990 en Ainsworth et al. 1997). A la vez se ha diseñado una gran variedad de instrumentos para predecir el VO₂ a partir de ejercicios de carácter SM, los cuales se han basado en la relación entre el VO₂ máx. y la FC llevadas a cabo en diferentes maquinarias como cicloergómetros, cintas rodantes, etc. (Klusiewicz et al. 2011). Protocolos en escalones se detallan en la tabla I.

Tabla 1. Protocolos submáximos en banco ergométrico que predicen el VO ₂ máx. a partir de la frecuencia cardíaca de recuperación y otros parámetros (FC: frecuencia cardíaca; SEE: error de estimación estándar).						
Estudio	n	Edad años	Género/salud	Variables predictoras del VO ₂ máx. (ml/kg/min)	R	SEE (%)
McArdle (1990)	--	--	Hombres	$11,33 - (0,42 * FC \text{ recuperación } p/m)$	--	(16)
McArdle (1990)	--	--	Mujeres	$65,81 - (0,1847 * FC \text{ recuperación } p/m)$	--	(16)
McArdle (1972)	41	18-22	Mujeres sanas	FC recuperación	0,92	2,9
Jette (1976)	24	15-74	Mujeres	Edad, masa corporal, VO ₂ , FC de recuperación	--	4,1
Jette (1976)	35	15-74	Hombres	Edad, masa corporal, VO ₂ , FC de recuperación	--	4,1

Otros autores han validado pruebas en escalón para predecir el VO₂ máx. a partir de la FCR en poblaciones específicas.

Tabla 2. Validación de test en escalón en la última década (FC: frecuencia cardíaca; SEE: error de estimación estándar).

Estudio	n	Edad años	Género/condición	Variables predictoras del VO ₂ máx. (ml/kg/min)	r	SEE	p
Chatterjee (2005)	40	21,9	Mujeres sedentarias	FC p/m = 54,12 – 0,13 * VO ₂ máx.	-0,83	0,34	<0,001
Chatterjee (2004)	30	22,6	Hombres sedentarios	55,23 – (0,09 * FC recuperación)	-0,96	--	<0,001

Las pruebas submáximas en cicloergómetro han reportado ser válidas en diferentes poblaciones para estimar el VO₂ máx.

Tabla 3. Protocolos submáximos en cicloergómetro para estimar el VO₂ máx. a partir de la frecuencia cardíaca y otros parámetros (FC: frecuencia cardíaca; SEE: error de estimación estándar).

Estudio	n	Edad años	Género/salud	Variables predictoras del VO ₂ máx.	R	SEE	p
Åstrand (1954)	27	18-30	Hombres sanos	Nomograma (**)	--	0,28	--
	31	--	Mujeres sanas	Nomograma (**)	--	0,27	--
Siconolfi (1982)	25	20-70	Hombres sanos	VO ₂ , Åstrand, edad (**)	0,86	0,36	--
	28	--	Mujeres sanas	VO ₂ , Åstrand, edad (**)	0,97	0,2	--
Siconolfi (1982)	63	20-70	Hombres y mujeres	Edad, VO ₂ estimado en nomograma Åstrand (**)	0,94	0,248	--
Legge (1986)	25	20-29	Hombres sanos	¿Nomograma?, FC (FC máx. - FC a carga 0) (**)	0,98	0,17	--
Akalan (2008)	80	--	Hombres y mujeres	Masa corporal, FC recuperación, vatios, género (*)	0,87	4,23	<0,0001
Fox (1973)	87	17-27	Hombres	FC a 5 minutos 150 W (*)	0,76	246	--
Darby y Pholman (1999)	--	--	Mujeres	Edad, masa corporal, FC (*)	0,74†	250	<0,0001
Åstrand y Rhyning (1954)	--	--	Mujeres	Edad, FC, potencia W (**)	--	--	--

† Coeficiente de correlación de Pearson. (*) Predice el VO₂ máx. en ml/min y (**) en L/min.

También existen muchas pruebas para predecir el VO_2 máx. por medio de la FC durante el ejercicio o post-ejercicio y la carrera (Åstrand, 1954; Balke, 1959; Cooper, 1968; Fox, 1973; Hermiston, 1971; Wyndhan, 1967 y Wyndhan 1966 en McArdle, Katch y Katch, 1990). Algunos test de campo se detallan en las siguientes tablas.

Tabla 4. Protocolos de campo para estimar el VO_2 máx. por medio de la frecuencia cardíaca, entre otros parámetros (FC: frecuencia cardíaca; SEE: error de estimación estándar).

Estudio	n	Edad años	Género/salud	VARIABLES predictoras del VO_2 máx.	R	SEE
Kline (1987)	343	18-23	Hombres y mujeres	Masa corporal, edad, género, tiempo, FC (**)	0,93	0,325
Coleman (1976)	90	20-29	Hombres y mujeres sanos	Tiempo caminata, FC, género, edad, masa (***)	0,79	5,68
Kline (1987)	343	30-69	Hombres y mujeres	Tiempo caminando, edad, FC, masa corporal (**)	0,93	0,325

(***) Predicen el VO_2 máx. en ml/kg/min y (**) en L/min.

Los protocolos en cinta rodante pueden ejecutarse por medio de la caminata o la carrera.

Tabla 5. Protocolos en cinta rodante para estimar el VO_2 máx. a través de la frecuencia cardíaca y otros parámetros (RER: índice de intercambio respiratorio; FC: frecuencia cardíaca; SEE: error de estimación estándar).

Estudio	n	Edad años	Género/salud	VARIABLES predictoras del VO_2 máx.	R	SEE
Ebbeling (1992)	67	20-59	Hombres	Velocidad caminando, género, edad, FC (***)	0,96	5
Wilmore (1974)	42	18-30	Hombres sanos	Masa corporal, edad, género, tiempo, FC (***)	0,76	5
Widrick (1992)	145	--	Hombres sanos	Masa corporal, edad, género, tiempo, FC (***)	0,91	5,26
Bonen (1979)	100	15	Hombres	FC, VCO_2 , VO_2 , edad (**)	0,95	0,17
Metz (1971)	60	13	Hombres	FC, RER, VO_2 (***)	0,7	--
Metz (1971)	60	14-15	Hombres	FC, VO_2 , RER (***)	0,48	3,8
Hermiston (1971)	28	25-45	Hombres	Edad, FC, CO_2 , RER	0,9	--

(**) Predicen el VO_2 máx. en L/min y (***) en ml/kg/min.

CONCLUSIÓN

La FCR podría ser un indicador válido para estimar el VO_2 máx., posiblemente cuando es post-ejercicio SM. Sin embargo, se debieran considerar otros parámetros que influyen en la predicción del VO_2 máx. como la masa corporal, el género, la edad, el nivel de condición física, etc. sin descartar parámetros antropométricos y fisiológicos.

Como lo muestran algunos estudios realizados en bancos ergométricos y cicloergómetros, la FCR post-ejercicio SM parece ser inversamente proporcional al VO_2 máx. Por lo tanto, supuestamente también la FCR post-ejercicio SM en otros ergómetros como cintas rodantes, remoergómetros u otras formas de ejecución como el nado también sería inversamente proporcional al VO_2 máx.

La predicción del VO_2 máx. a partir de la FCR así como la relación inversa entre estos parámetros se debe considerar con precaución, pues no podrían ser generalizados a diferentes poblaciones ya que los sujetos podrían tener distinta condición física, edad, características antropométricas, etc.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Achten, J. & Jeukendrup, A. E. (2003). Heart rate monitoring applications and limitations. *Sports Medicine*, 33(7), 517-538.
2. Ainsworth, B. E, McMurray, R. G & Veazey, S. K. (1997). Prediction of peak oxygen uptake from submaximal exercise test in older men and women. *Journal of Aging and Physical Activity*, 5, 27-38.
3. Akalan, C., Robergs, R. R. & Kravitz, L. (2008). Prediction of VO_2 máx from an individualized submaximal cycle ergometer protocol. *Journal of Exercise Physiology*, 11(2), 1-17.
4. Arena, R., Arrowood, J. A., Fei, D., Shelar, S., Helm, S. & Kraft, K. A. (2010). The influence of sex on the relationship between heart rate recovery and other cardiovascular risk factors in apparently healthy subjects. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sport*, 20, 291-297.
5. Barak, O. F., Jakovljevic, D. J., Popadic, J. Z., Ovcin, Z. B., Brodie, D. A. & Grujic, N. J. (2010). Heart rate variability before and after cycle exercise in relation to different body positions. *Journal of Sport Science and Medicine*, 9, 176-182.
6. Borresen, J. & Lambert, M. I. (2008). Autonomic control of heart rate during and after exercise. *Sport Med*, 38(8), 633-646.
7. Buchheit, M., Duché, P., Laursen, P. B. & Ratel, S. (2010). Postexercise heart rate recovery in children: relationship with power output, blood pH, and lactate. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 35, 142-150.
8. Buono, M. J., Roby, J. J., Micale, F. J, Sallis, J. F. & Shepard, W. E. (1991). Validity and reliability of predicting maximum oxygen uptake via field test in children and adolescents. *Pediatric Exercise Science*, 3, 250-255.
9. Carmouche, D. G., Bubein, R. S. & Kay, N. G. (1998). The effect of maximum heart rate on oxygen kinetics and exercise performance at low and high workloads. *Pace*, 21, 679-686.

10. Chatterjee, S., Chatterjee, P., Mukherjee, P. S. & Bandyopadhyay, A. (2004). Validity of Queen's College step test for use with young Indian men. *British Journal Sports Medicine*, 38(3), 289-291.
11. Chatterjee, S., Chatterjee, P. & Bandyopadhyay, A. (2005). Validity of Queen's College Step Test for estimation of maximum oxygen uptake in female students. *Indian Journal of Medical Research*, 121(1), 32-35.
12. Chen, S. M., Wang, J. S., Lee, W. C., Hou, C. W., Chen, C. Y., Laio, Y. H.,... & Kuo, C. H. (2006). Validity of the 3 min step test in moderate altitude: environmental temperature as a confounder. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 31, 726-730.
13. Darby, L. A. & Marsh, J. L. (2007). Specificity of a maximal step exercise test. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*, 11(3), 131-148.
14. Darby, L. A. & Pohlman, R. L. (1999). Prediction of max VO₂ for women: adaptation of the Fox cycle ergometer protocol. *Journal of Exercise Physiology*, 2(4) 1-8.
15. Karavirta, L., Tulppo, M. P. , Nyman, K., Laaksonen, D. E., Pullinen, T., Laukkanen, R. T.,... & Hakkinen, K. (2008). Estimation of maximal heart rate using the relationship between heart rate variability and exercise intensity in 40-67 years old men. *European Journal of Applied Physiology*, 103, 25-32.
16. Keytel, L. R., Goedecke, J. H., Noakes, T. D., Hiiloskorpi, H., Laukkanen, R., Van der Merwe, L. & Lambert, E. V. (2005). Prediction of energy expenditure from heart rate monitoring during submaximal exercise. *Journal of Sport Sciences*, 23(3), 289-297.
17. Klusiewicz, A., Faff, J. & Starczewska-Czapowska, J. (2011). Prediction of maximal oxygen uptake from submaximal and maximal exercise on a ski ergometer. *Biology of Sport*, 28(1), 31-35.
18. Lai, N., Nasca, M., Silva, M. A., Silva, F. T., Whipp, B. J. & Cabrera, M. K. (2007). Influence of exercise intensity on pulmonary oxygen uptake kinetics at the onset of exercise and recovery in male adolescents. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 33, 107-117.
19. Lamberts, R. P., Lemmink, K., Durandt, J. J., & Lambert, M. I. (2004). Variation in heart rate during submaximal exercise: implications for monitoring training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18(3), 641-645.
20. Lamberts, R. P., Swart, J., Noakes, T. D. & Lambert, M. I. (2009). Changes in heart rate recovery after high-intensity training in well-trained cyclists. *European Journal of Applied Physiology*, 105, 705-713.
21. Lambrick, D. M. Faulkner, J. A. Rowlands, A. V. & Eston, R. G. (2009). Prediction of maximal oxygen uptake from submaximal ratings of perceived exertion and heart rate during a continuous exercise test: the efficacy of RPE 13. *European Journal of Applied Physiology*, 107, 1-9.

22. Leite, P. H. , Melo, R. C., Mello, M. F., Da Silva, E., Borghi-Silva, A. e Catai, A. M. (2010). Resposta da frequência cardíaca durante o exercício isométrico de pacientes submetidos à reabilitação cardíaca fase III. *Revista Brasileira de Fisioterapia*, 14(5), 383-389.
23. Lubans, D. R., Morgan, P. J., Callister, R. & Collins, C. E. (2008). The relationship between pedometer step counts and estimated VO_2 máx. as determined by a submaximal fitness test in adolescents. *Pediatric Exercise Science*, 20, 273–284.
24. Lubans, D. R., Morgan, P. J., Collins, C. E., Boreham, C. A. & Callister, R. (2009). The relationship between heart rate intensity and pedometer step counts in adolescents. *Journal Sport Sciences*, 27(6), 591-597.
25. Martinmäki, K., Häkkinen, K., Mikkola, J. & Rusko, H. (2008). Effect of low-dose endurance training on heart rate variability at rest and during an incremental maximal exercise test. *European Journal of Applied Physiology*, 104, 541-548.
26. McArdle, W., Katch, F. & Katch, V. (1990). *Fisiología del ejercicio: energía, nutrición y rendimiento humano* (2a ed.). Madrid, España: Alianza Deporte.
27. Noordhof, D. A., Koning, J. J. & Foster, C. (2010). The maximal accumulated oxygen deficit method. *Sports Medicine*, 40(4), 285-302.
28. Robergs, R. A. & Landwehr, R. (2002). The surprising history of the "HRmax=220-age" equation. *Official Journal of The American Society of Exercise Physiologists*, 5(2), 1-10.
29. Souza, M. S., Lima, A. C., Silva, J. A., Silva, G. C., Pontes, L. M. & Lira, F. A. (2007). Cardiac frequency and blood pressure in different loads in the cirilo's ergometer step in the active women. *Fitness Performance*, 6(3), 156-161.
30. Stathokostas, L., Kowalchuk, J. M., Petrella, R. J., & Paterson, D. H. (2009). Moderate and heavy oxygen uptake kinetics in postmenopausal women. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 34, 1065-1072.
31. Thomas, J. y Nelson, J. (2007). *Métodos de investigación en actividad física*. Badalona, España: Paidotribo.
32. Xu, F. & Rhodes, E. C. (1999). Oxyegn uptake kinetics during exercise. *Sport Meds*, 27(5), 313-327.
33. Yoshida, T., Abe, D., Fukuoka, Y. & Hughson, R. L. (2008). System analysis for oxygen uptake kinetics with step and pseudorandom binary sequence exercise in endurance athletes. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*, 12, 1-9.
34. Zaletel, P., Furjan-Mandic, G. & Zagorc, M. (2009). Differences in heart rate and lactate levels at three different workloads in step aerobics. *Kinesiology*, 41(1), 97-104.