

Universitat de Barcelona

Departamento de Didáctica de la Expresión Musical y Corporal

Máster Oficial en Actividad Motriz y Educación

La frecuencia cardíaca de recuperación como indicador del consumo máximo de oxígeno¹

Contenidos

Resumen	1
1. Introducción	2
2. Objetivos	3
3. Diseño de investigación	3
4. Revisión de la literatura	3
4.1 Frecuencia cardíaca en ejercicio submáximo y máximo.....	3
4.1.1 Comportamiento de la frecuencia cardíaca en fase de ejercicio.....	3
4.1.2 Frecuencia cardíaca en fase de recuperación	5
4.2 Consumo de oxígeno en el ejercicio submáximo y máximo	7
4.2.1 Cinética del consumo de oxígeno en el ejercicio submáximo y máximo.....	7
4.3 Frecuencia cardíaca y consumo de oxígeno.....	10
4.3.1 Relación entre frecuencia cardíaca y consumo de oxígeno	10
4.3.2 Predicción del consumo máximo de oxígeno a través de la frecuencia cardíaca de recuperación en tests submáximos.....	11
5. Conclusiones	15
6. Referencias	15

Tablas

Tabla I. Protocolos submáximos en banco ergométrico que predicen el VO ₂ máx. a partir de la frecuencia cardíaca de recuperación y otros parámetros	13
Tabla II. Validación de test en escalón en la última década	14
Tabla III. Protocolos submáximos en cicloergómetro para estimar el VO ₂ máx. a partir de la frecuencia cardíaca y otros parámetros.	14
Tabla IV. Protocolos de campo para estimar el VO ₂ máx. por medio de la frecuencia cardíaca, entre otros parámetros.....	14
Tabla V. Protocolos en cinta rodante para estimar el VO ₂ máx. a través de la frecuencia cardíaca y otros parámetros.....	15

¹ Jaime Vásquez Gómez.

Master en Educación Física Universidad Católica del Maule – Chile, 2011.
Estudiante de Master en Actividad Motriz y Educación, curso 2011 - 2012.

Cuadros

Cuadro 1. Relación porcentual entre consumo de oxígeno y frecuencia cardíaca.....	10
---	----

Figuras

Figura 1. Nomograma de Åstrand y Rhymining.....	12
Figura 2. Relación inversa entre frecuencia cardíaca de recuperación y VO ₂ máx.....	13

Resumen

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 frecuencia cardíaca 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 otro lado por el sistema autónomo simpático. Un método no invasivo para mensurar la respuesta autónoma del sistema nervioso es el comportamiento de la frecuencia cardíaca.

Uno de los medios no invasivos para controlar la respuesta del sistema nervioso autónomo es la frecuencia cardíaca de recuperación post-ejercicio. Ésta es la velocidad con que la frecuencia cardíaca disminuye post-ejercicio moderado o intenso. Se supone que la frecuencia cardíaca de recuperación 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. En su modulación incide el sistema simpático, parasimpático y variables neurales y humorales. También el descenso en el comportamiento de la frecuencia cardíaca post-ejercicio puede deberse a efectos hormonales sobre la modulación vagal. Se ha demostrado que influye en la recuperación de la frecuencia cardíaca la posición del cuerpo, el género y la edad.

Tras el comienzo del ejercicio submáximo el consumo de oxígeno no puede llegar de inmediato al estado estable, por lo que otras fuentes de energía deben cumplir ésta transición, como es el caso de la fosfocreatina y las reservas de oxígeno musculares. La cinética del consumo de oxígeno tiene un área de esfuerzo moderado que 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. En una segunda fase comienza a ocurrir cambios metabólicos que dan lugar un estado estacionario del consumo de oxígeno, por lo tanto se ha establecido una relación lineal entre la cinética del VO₂ y el ritmo de trabajo. Por su parte, en el ejercicio de alta intensidad existe un componente lento del VO₂ que se presenta en esta segunda fase, el cual retrasa el estado estacionario y se relaciona con el inicio de acumulación de lactato. En la tercera fase existe un estado de equilibrio en el consumo de oxígeno durante el ejercicio submáximo, la que se alcanza luego de 3 minutos aproximadamente a intensidades moderadas.

La frecuencia cardíaca tiene una estrecha relación con el VO₂ máx. como marcadores de intensidad en el ejercicio, la cual está sujeta al tipo de ejercicio, posición del cuerpo, masa

muscular involucrada, etc. Sin embargo, hay una relación entre la frecuencia cardíaca y el VO_2 máx. en forma porcentual que se aprecia el ejercicio de corta duración y en estado estacionario.

Predecir el consumo máximo de oxígeno a partir de la frecuencia cardíaca se ha utilizado en pruebas submáximas en bancos ergométricos. Esta estimación se ha efectuado por medio del nomograma de Åstrand y Rhyming y a través del test del escalón de McArdle. Ambas formas utilizan la frecuencia cardíaca de recuperación post-ejercicio submáximo. Existen varios protocolos submáximos en bancos ergométricos, cicloergómetros, cintas rodantes que predicen el VO_2 máx. por medio de la frecuencia cardíaca de recuperación. Entre ellos la prueba del escalón de McArdle se ha validado en hombres y mujeres. En cicloergómetro se encuentra el protocolo de Åstrand en hombres y mujeres, también el protocolo de Fox en hombres. No obstante, se han desarrollado múltiples ecuaciones para estimar el VO_2 máx. a través de pruebas de esfuerzo submáximo en cinta rodante, cicloergómetros y escalones ergométricos por medio de la frecuencia cardíaca de recuperación y otros parámetros. Así, la frecuencia cardíaca de recuperación es un indicador válido para estimar el VO_2 máx. post-ejercicio submáximo y posiblemente lo sea en otros ergómetros y con otras formas de ejecución.

Palabras clave: frecuencia cardíaca de recuperación, consumo máximo de oxígeno, correlación, test submáximo, predicción.

1. Introducción

Para prescribir y evaluar la intensidad del ejercicio aeróbico se ha utilizado porcentajes de la frecuencia cardíaca, del consumo máximo de oxígeno, 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 frecuencia cardíaca con el consumo de oxígeno se ha establecido desde hace bastante tiempo en el ejercicio aeróbico de esfuerzo submáximo 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 ser por medio de un porcentaje de la frecuencia cardíaca, también a través de la frecuencia cardíaca de recuperación post-ejercicio submáximo. Esta forma de predicción se ha utilizado en protocolos de algunos test validados y expuestos en la literatura.

En el artículo se expone el comportamiento de la frecuencia cardíaca y del consumo de oxígeno durante el ejercicio aeróbico así como el comportamiento de la frecuencia cardíaca en la recuperación del mismo. 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 frecuencia cardíaca de recuperación. Finalmente se presentan las conclusiones del trabajo.

2. Objetivos

Demostrar la relación entre la frecuencia cardíaca de recuperación y el consumo máximo de oxígeno.

Aportar evidencia científica sobre la frecuencia cardíaca de recuperación post-ejercicio submáximo y su validez para predecir el consumo máximo de oxígeno.

3. Diseño de investigación

El diseño de investigación se enmarca en una revisión bibliográfica en la base de datos EBSCO a través de SPORTDiscus que está suscrita a la Universidad Santo Tomás de Talca, Chile. También se ha revisado direcciones electrónicas y libros.

De la base de datos se ha revisado sólo textos completos con un total de 30 artículos correspondientes entre los años 1991 y 2011. Entre las revistas científicas revisadas se encuentra Sport Medicine, Journal of Exercise Physiology, Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism, European Journal of Applied Physiology, Journal of Sport Sciences, entre otras.

De las direcciones electrónicas URL se ha revisado 2 artículos, los que no se encontraron en SPORTDiscus, que pertenecen a British Journal of Sports Medicine y a Indian Journal of Medical Research que datan de los años 2004 y 2005, respectivamente.

Por último, se ha revisado un libro perteneciente a la Biblioteca de la Universidad de Barcelona Campus Mundet del año 1990.

De tal modo que se realizó una revisión de toda esta literatura para conformar el estado del arte y darle un marco de conocimiento sustentable a los objetivos del trabajo.

4. Revisión de la literatura

4.1 Frecuencia cardíaca en ejercicio submáximo y máximo

4.1.1 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 frecuencia cardíaca 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 otro lado por el sistema autónomo simpático (Freeman, 2006 en Leite et al. 2010). El sistema nervioso simpático y parasimpático se relacionan con otros sistemas fisiológicos (Borresen y Lambert, 2008; Kiviniemi, 2007 en Lamberts, Swart, Noakes y Lambert, 2009).

Un método no invasivo para mensurar la respuesta autónoma del sistema nervioso es el comportamiento de la frecuencia cardíaca (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 frecuencia cardíaca 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 frecuencia cardíaca (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 frecuencia cardíaca 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 frecuencia cardíaca se ha determinado generalmente sobre el control autónomo del ritmo cardíaco en estado de reposo (Martinmäki, Häkkinen, Mikkola y Rusko, 2008). No obstante, se ha elaborado un análisis de estos parámetros en estado no estacionario para verificar los cambios transitorios de la frecuencia cardíaca (Kaikkonen, 2007; Martinmäki, 2006b; Martinmäki y Rusko, 2008; Pichon, 2004 en Martinmäki et al. 2008).

Una de las aplicaciones más importantes de la frecuencia cardíaca como indicador de la intensidad ha sido durante el ejercicio submáximo (Robergs y Landwehr, 2002). Se ha propuesto que una intensidad liviana de ejercicio estaría bajo el 75% de la frecuencia cardíaca 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 frecuencia cardíaca pico para aplicar una carga de ejercicio submáximo en cicloergómetro. También se ha indicado que la variación de la frecuencia cardíaca durante un ejercicio submáximo parece estar entre 3 y 6 pulsaciones por minuto (Arts y Kuipers, 1994; Brisswalter y Legros, 1994; Lambert, 1998 en Lamberts, Lemmink, Durandt, y Lambert, 2004).

A altas intensidades la frecuencia cardíaca 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 frecuencia cardíaca (Conconi, 1982 en Achten y Jeukendrup, 2003) en el cual se ha encontrado una relación lineal entre la frecuencia cardíaca 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 – frecuencia cardíaca, al mismo tiempo que el umbral anaeróbico.

4.1.2 Frecuencia cardíaca en fase de recuperación

Para de la medición de la condición física en ejercicio submáximo se ha utilizando pruebas en escalón, en éstas los diferentes ángulos que se provocan en las extremidades inferiores al ejecutar la subida y bajada del mismo estimulan el cambio de la frecuencia cardíaca (Souza et al. 2007). Uno de los medios no invasivos para controlar la respuesta del sistema nervioso autónomo es la frecuencia cardíaca de recuperación post-ejercicio (Borresen y Lambert, 2007; Hedelin, 2000; Lamberts, 2004 en Lamberts et al. 2009). Ésta es la velocidad con la que disminuye post-ejercicio moderado o intenso (Shetler, 2001 en Lamberts et al. 2009).

Las pruebas de subir y bajar escalones sirven para verificar la frecuencia cardíaca durante el esfuerzo y la recuperación de la misma post-ejercicio, la cual es un indicador del estado cardiopulmonar. De manera que cuando la frecuencia cardíaca de recuperación 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 frecuencia cardíaca de recuperación 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 frecuencia cardíaca 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 frecuencia cardíaca post-ejercicio la cual expresa claramente el comportamiento de dicha curva tras el esfuerzo submáximo, ya que el sistema parasimpático desencadenaría esta curva exponencial (Pierpont, 2000 en Borresen y Lambert, 2008). La frecuencia cardíaca de recuperación post-ejercicio es controlada por medio de interacciones complejas entre variables neurales y humorales (Buchheit, 2007b en Buchheit, Duché, Laursen y Ratel, 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 frecuencia cardíaca 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 frecuencia cardíaca de recuperación (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 frecuencia cardíaca, 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 frecuencia cardíaca 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 submáximo observado en niños y niñas, por lo tanto es importante controlar la intensidad del ejercicio para medir con mayor precisión la frecuencia cardíaca durante la recuperación (Mahon, 2003 en Borresen y Lambert, 2008). A diferencia de los niños y las niñas, un estudio ha señalado que la frecuencia cardíaca de recuperación 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 submáximo 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 submáximo (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 submáximo estandarizada con el fin de verificar la respuesta a los entrenamientos (Borresen y Lambert, 2008).

La frecuencia cardíaca de recuperación 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 frecuencia cardíaca depende de la intensidad del ejercicio y de la modalidad (Gladwell, 2010; Kaikkonen, 2008 en Barak et al.). 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 frecuencia cardíaca 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.). Sin embargo, se ha encontrado que la recuperación en el comportamiento de la frecuencia cardíaca fue moderadamente afectada por la posición del cuerpo en el ejercicio (Buchheit, 2009 en Barak et al.). La recuperación según la posición del cuerpo en el esfuerzo puede prescribir la recuperación de la frecuencia cardíaca post-ejercicio submáximo (Barak et al.). El ejercicio de alta intensidad provoca una reactivación vagal acompañada de otros fenómenos produciendo que la frecuencia cardíaca no llegue a valores de reposo luego de 10 minutos (Arai, 1989; Pober, 2004; Takahashi, 2000 en Barak et al.), luego de 15 minutos (Gladwell, 2010; Mourot, 2004; Pober, 2004; Terziotti, 2001 en Barak et al.), luego de 30 minutos (Javorka, 2002 en Barak et al.) e inclusive luego de una hora (Furlan, 1993; James, 2002; Mourot, 2004; Terziotti, 2001 en Barak et al.).

Aunque es sabido que las respuestas fisiológicas variables en un ejercicio submáximo pueden resultar de la contribución de las vías aeróbicas y anaeróbicas, las cuales van a

depender de la frecuencia cardíaca máxima y del consumo máximo de oxígeno (Meyer, 1999 en Barak et al. 2010), los estudios reportados sobre la recuperación del comportamiento de la frecuencia cardíaca post-ejercicio han definido las intensidades de carga como porcentajes del VO_2 máx. (Kaikkonen, 2010; Parekh y Lee, 2005; Takahashi, 2000 en Barak et al.) entre otros parámetros.

Se ha demostrado que la recuperación de la frecuencia cardíaca en 15 minutos tras realizar un ejercicio submáximo 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. en donde encuentran que después del ejercicio submáximo hubo un retraso de la actividad vagal y en algunos parámetros del comportamiento de la frecuencia cardíaca independiente de las posiciones del cuerpo en el ejercicio. El descenso en el comportamiento de la frecuencia cardíaca post-ejercicio puede deberse a efectos hormonales sobre la modulación vagal (Miyamoto, 2003 en Barak et al.). 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.). Finalmente, Barak et al. en su estudio sugieren que luego de 15 minutos de realizar ejercicio submáximo los valores de frecuencia cardíaca 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 cual es la posición del cuerpo más favorable para acelerar la recuperación de la regulación autonómica cardíaca.

4.2 Consumo de oxígeno en el ejercicio submáximo y máximo

4.2.1 Cinética del consumo de oxígeno en el ejercicio submáximo y máximo

Tras el comienzo del ejercicio submáximo el consumo de oxígeno no puede llegar de inmediato al estado estable, por lo que otras fuentes de energía deben cumplir ésta transición, como es el caso de la fosfocreatina (PCr) y las reservas de oxígeno musculares (Barstow, 1994 en Xu y Rhodes, 1999). Se ha demostrado que los niveles de PCr disminuyen al inicio del ejercicio submáximo a una intensidad del 65% del VO_2 máx. y luego no hay cambios en ella (Green, 1995 en Xu y Rhodes, 1999). Junto a esto, se ha reportado una correlación entre la disminución de la PCr y el tiempo en que responde el consumo de oxígeno en el ejercicio submáximo. También se ha encontrado que las constantes de tiempo de la cinética de la PCr fueron similares a la cinética del consumo de oxígeno en la fase de estado estacionario (Barstow, 1994 en Xu y Rhodes, 1999), por tanto la cinética de la PCr refleja la del consumo de oxígeno. Así, la cinética del VO_2 es muy similar a la de la PCr al inicio del ejercicio, tanto de forma experimental (Rossiter, 2002 en Lai et al. 2007) como teórica (Kushmerick, 1998 en Lai et al.). Esta idea se ha reafirmado en otro estudio (McCreary, 1996 en Xu y Rhodes, 1999). Sin embargo, se ha planteado que en personas jóvenes al ocurrir más rápido el fenómeno de la aceleración de la cinética del consumo de oxígeno pulmonar, el esfuerzo no requiere de una producción de energía anaeróbica aportada por la PCr en el ejercicio submáximo (Stathokostas, Kowalchuk, Petrella y Paterson, 2009).

La respuesta del consumo de oxígeno en el ejercicio también varía según la posición del cuerpo, pues la cinética del VO_2 es más lenta en posición supina que en posición vertical (Convertino, 1984; Hughson, 1991 en Xu y Rhodes, 1999). Esta cinética se ha estudiado generalmente en músculos pequeños, pues la dificultad técnica de utilizar medios no invasivos para la medición de la PCr y el flujo de sangre así lo amerita. Sin embargo, existe similitud en el estrés fisiológico entre la musculatura pequeña y la musculatura más grande, pero la extrapolación de resultados debe realizarse con precaución (Hughson, 1990 en Xu y Rhodes, 1999). Se ha encontrado una respuesta menor de la cinética del consumo de oxígeno en la musculatura de los brazos en comparación con la musculatura de las piernas (Cerretelli, 1977; Davis, 1972 en Xu y Rhodes, 1999).

Se ha sugerido que en el ejercicio submáximo de ciclismo a intensidades bajas de 50, 55 y 100 vatios el consumo de oxígeno 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 consumo de oxígeno 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 frecuencia cardíaca más baja ya que el volumen sistólico alcanza su máximo entre el 40 y el 50% del consumo máximo de oxígeno, 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 consumo de oxígeno 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 consumo de oxígeno tiene un rápido aumento, este aumento se completa entre los primeros 15 a 25 segundos aproximadamente. Esta fase se aprecia mejor sobretodo 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 consumo de oxígeno 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 O_2 venoso del músculo no llegaría a los pulmones en tan corto tiempo, de manera que no afectaría esta fase de la cinética del consumo de oxígeno. Sin embargo esto es contradictorio, pues se ha demostrado que el O_2 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 consumo de oxígeno 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 consumo de oxígeno 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 consumo de oxígeno 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 comienza a ocurrir cambios metabólicos que dan lugar un estado estacionario del consumo de oxígeno, 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 2 la capacidad oxidativa de la musculatura no afecta en la mejora de la cinética del consumo de oxígeno (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 consumo de oxígeno 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 consumo de oxígeno son necesarios modelos matemáticos de la biofísica que describan el transporte de oxígeno en diferentes intensidades de ejercicio (Lai et al.). Esta idea se ha propuesto en otros estudios recientes (Korzeniewski y Zoladz, 2004; Lai, 2006, 2007 en Lai et al.). 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 consumo de oxígeno al sexto minuto de ejercicio (o hasta su término) y a los tres minutos (Whipp, 1972 en Xu y Rhodes, 1999). El consumo de oxígeno 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 consumo de oxígeno durante el ejercicio de intensidad pesada (Barstow, 1996; Pringle, 2003 en Lai et al.).

En la tercera fase existe un estado de equilibrio en el consumo de oxígeno durante el ejercicio submáximo, 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 O₂/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 consumo de oxígeno 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).

4.3 Frecuencia cardíaca y consumo de oxígeno

4.3.1 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 frecuencia cardíaca, el consumo máximo de oxígeno, 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 consumo máximo de oxígeno se ha realizado en función de indicadores como la frecuencia cardíaca y el índice de esfuerzo percibido en ejercicio submáximo (Davies, 2008; Eston, 2008; Faff, 2007; Klusiewicz, 2004 en Klusiewicz, Faff y Starczewska-Czapowska, 2011). Así, la frecuencia cardíaca tiene una estrecha relación con el índice de esfuerzo percibido y el VO₂ máx. como marcadores de intensidad en el ejercicio (Lambrick, Faulkner, Rowlands y Eston, 2009).

Se debe tener en cuenta que la relación entre el VO₂ máx. y la frecuencia cardíaca responde al tipo del ejercicio, masa muscular involucrada, la posición del cuerpo, intensidad del ejercicio, el ambiente, etc. (Darby y Marsh, 2007). La frecuencia cardíaca tiene una relación lineal con el gasto energético durante el estado de equilibrio en ejercicio y también una estrecha relación con el VO₂ máx. (Lubans, Morgan, Collins, Boreham y Callister, 2009). Cuando la frecuencia cardíaca y el consumo de oxígeno 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). Se ha establecido una relación entre la frecuencia cardíaca y el VO₂ máx. como se aprecia en el cuadro 1. Nótese que el porcentaje de la frecuencia cardíaca siempre es mayor al del VO₂ máx.

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

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

En un estudio realizado por Keytel et al. se estableció que el 35, 62 y 80% del consumo máximo de oxígeno se correspondía con el 57, 77 y 90% de la frecuencia cardíaca 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 frecuencia cardíaca podría ser un buen indicador de la intensidad del ejercicio cuando el esfuerzo sea de carácter moderado cercano al 50% del VO_2 máx. (Berry, 1992 en Zaletel et al. 2009).

En el ejercicio de corta duración y en estado estacionario existe una relación lineal entre la frecuencia cardíaca, el consumo máximo de oxígeno 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 frecuencia cardíaca y el VO_2 máx. lo cual está sujeto a las diferencias individuales de las personas (Keytel et al. 2005).

En algunos casos la utilización de la frecuencia cardíaca para la predicción del consumo máximo de oxígeno en ejercicio submáximo puede tener errores, como se ha encontrado en el protocolo YMCA (Robergs y Landwehr, 2002). Por su parte, el consumo máximo de oxígeno podría predecir la frecuencia cardíaca submáxima posiblemente por la relación lineal que existe entre estos parámetros o la variación de la frecuencia cardíaca día a día (McArdle, 1986 en Buono, Roby, Micale, Sallis y Shepard, 1991).

4.3.2 Predicción del consumo máximo de oxígeno a través de la frecuencia cardíaca de recuperación en tests submáximos

Predecir el consumo máximo de oxígeno a partir de la frecuencia cardíaca en un ejercicio submáximo 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 frecuencia cardíaca tiene una buena relación con el VO_2 máx. al ejecutar una prueba en escalón con formas de movimiento variadas, además se ha indicado que el consumo máximo de oxígeno en una prueba en banco ergométrico y en cinta rodante ha sido similar (Darby y Marsh, 2007). También se ha observado que el consumo de oxígeno 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 VO_2 máx. a partir de la frecuencia cardíaca obtenida en un test submáximo se ha realizado por medio de un nomograma (Åstrand y Rhyning, 1954 en Achten y Jeukendrup, 2003). En este nomograma se puede notar que a menor frecuencia cardíaca de recuperación, en el test del escalón y en la prueba en cicloergómetro, el consumo máximo de oxígeno será mayor y viceversa en hombres y mujeres (Figura 1).

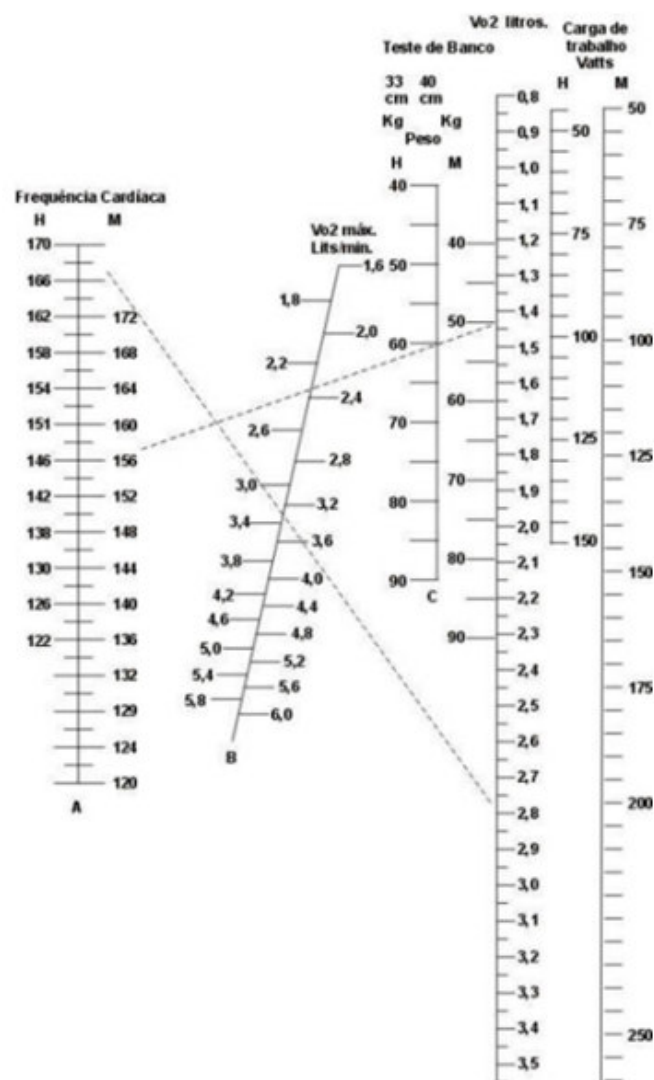


Figura 1. Nomograma de Åstrand y Rhymin.

De forma similar, se ha indicado que es posible calcular el consumo máximo de oxígeno por medio de la frecuencia cardíaca obtenida al finalizar la prueba de esfuerzo submáximo en escalón utilizando una ecuación de regresión, tanto para niñas como para niños (Lubans, Morgan, Callister y Collins, 2008). En este sentido Chatterjee, Chatterjee y Bandyopadhyay (2005) encuentran una relación inversa entre la frecuencia cardíaca de recuperación obtenida en el test del escalón de McArdle y el consumo máximo de oxígeno medido de forma directa en una muestra de 40 mujeres sedentarias, pues a menor frecuencia cardíaca de recuperación se observa un mayor consumo de oxígeno y a la inversa (Figura 2).

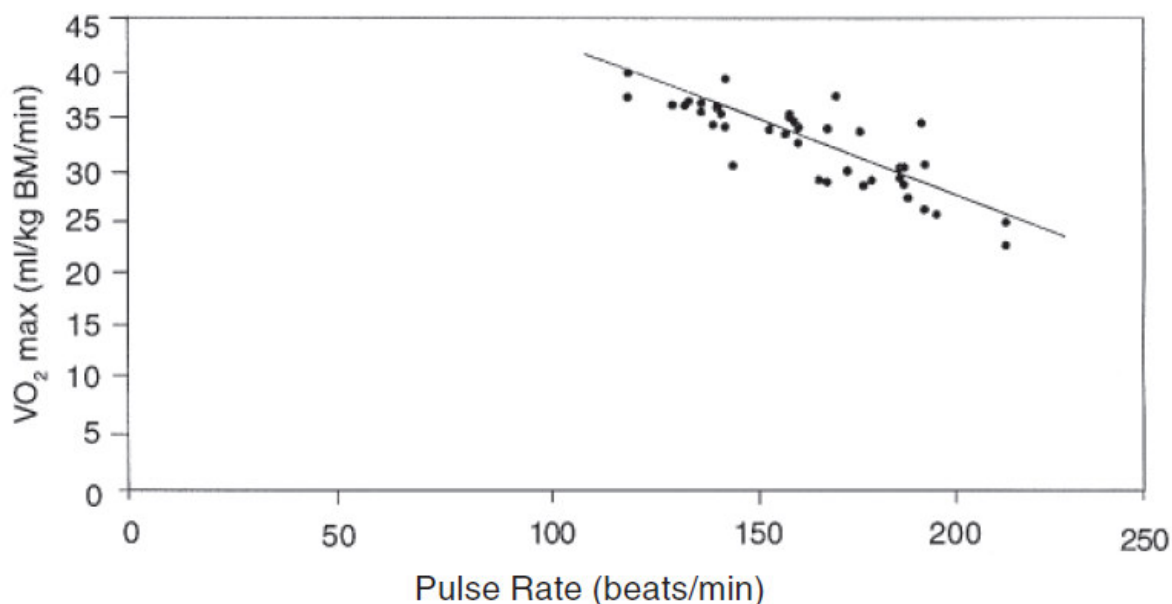


Figura 2. Relación inversa entre frecuencia cardíaca de recuperación y VO₂ máx. La ecuación para predecir el consumo máximo de oxígeno en ml/kg/min es $y = 54,12 - 0,13x$ (Chatterjee et al. 2005 p. 3).

Se han desarrollado múltiples ecuaciones para estimar el VO₂ máx. a través de pruebas de esfuerzo submáximo en cinta rodante, cicloergómetros y escalones ergométricos (Åstrand y Rhyning, 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 consumo de oxígeno a partir de ejercicios de carácter submáximo, los cuales se han basado en la relación entre el VO₂ máx. y la frecuencia cardíaca llevadas a cabo en diferentes maquinarias como cicloergómetros, cintas rodantes, etc. (Klusiewicz et al. 2011). Algunos de los protocolos en escalones ergométricos se detallan en la tabla I.

Tabla I. Protocolos submáximos en banco ergométrico que predicen el VO₂ máx. a partir de la frecuencia cardíaca de recuperación y otros parámetros.

Estudio	Referencia	n	Edad años	Género/salud	Variables predictoras del VO ₂ máx. ml/kg/min	R	SEE (%)
McArdle 1990	McArdle et al. 1990	--	--	Hombres	$11,33 - (0,42 * FC \text{ recuperación p/m})$	--	(16,0)
McArdle 1990	McArdle et al. 1990	--	--	Mujeres	$65,81 - (0,1847 * FC \text{ recuperación p/m})$	--	(16,0)
McArdle 1972	Akalan et al. 2008	41	18-22	Mujeres sanas	FC recuperación	0,92	2,9
Jette 1976	Akalan et al. 2008	24	15-74	Mujeres	Edad, masa corporal, VO ₂ , FC recuperación	--	4,1
Jette 1976	Akalan et al. 2008	35	15-74	Hombres	Edad, masa corporal, VO ₂ , FC recuperación	--	4,1

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

Tabla II. Validación de test en escalón en la última década.

Estudio	Referencia	n	Edad años	Género/salud	Variables predictoras del VO ₂ máx. ml/kg/min	r	SEE (%)	p
McArdle 1972	Chatterjee et al. 2005	40	21,9	Mujeres sedentarias	FC p/m = 54,12 - 0,13 * VO ₂ máx.	-0,83	0,34	<0,001
McArdle 1972	Chatterjee et al. 2004	30	22,6	Hombres sedentarios	55,23 - (0,09 * FC recuperación)	-0,96	--	<0,001

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

Tabla III. Protocolos submáximos en cicloergómetro para estimar el VO₂ máx. a partir de la frecuencia cardíaca y otros parámetros.

Estudio	Referencia	n	Edad años	Género/salud	Variables predictoras del VO ₂ máx.	R	SEE (%)	p
Åstrand 1954	Akalan et al. 2008	27	18-30	Hombres sanos	Nomograma (**)	--	0,28	--
		31	--	Mujeres sanas	Nomograma (**)	--	0,27	--
Siconolfi 1982	Akalan et al. 2008	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	Akalan et al. 2008	63	20-70	Hombres y mujeres	Edad, VO ₂ estimado en nomograma Åstrand (**)	0,94	0,248	--
Legge 1986	Akalan et al. 2008	25	20-29	Hombres sanos	Nomograma?, FC (FC máx. - FC a carga 0) (**)	0,98	0,17	--
Akalan 2008	Akalan et al. 2008	80	--	Hombres y mujeres	Masa corporal, FC recuperación, vatios, género (*)	0,87	4,23	<0,0001
Fox 1973	Akalan et al. 2008	87	17-27	Hombres	FC a 5 minutos 150 W (*)	0,76	246	--
Darby y Pholman 1999	Darby y Pholman 1999	--	--	Mujeres	Edad, masa corporal, FC (*)	0,74†	250	<0,0001
Åstrand y Rhyming 1954	Darby y Pholman 1999	--	--	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 consumo máximo de oxígeno por medio de la frecuencia cardíaca 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 IV. Protocolos de campo para estimar el VO₂ máx. por medio de la frecuencia cardíaca, entre otros parámetros.

Estudio	Referencia	n	Edad años	Género/salud	Variables predictoras del VO ₂ máx.	R	SEE
Kline 1987	Akalan et al. 2008	343	18-23	Hombres y mujeres	Masa corporal, edad, género, tiempo, FC (**)	0,93	0,325
Coleman 1976	Akalan et al. 2008	90	20-29	Hombres y mujeres sanos	Tiempo caminata 1 milla, FC, género, edad, masa (***)	0,79	5,68
Kline 1987	Akalan et al. 2008	343	30-69	Hombres y mujeres	Tiempo 1 milla caminando, edad, FC, masa corporal (**)	0,93	0,325

(***) Predice el VO₂ 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 V. Protocolos en cinta rodante para estimar el VO_2 máx. a través de la frecuencia cardíaca y otros parámetros.

Estudio	Referencia	n	Edad años	Género/salud	Variables predictoras del VO_2 máx.	R	SEE
Ebbeling 1992	Akalan et al. 2008	67	20-59	Hombres	Velocidad caminando, género, edad, FC (***)	0,96	5
Wilmore 1974	Akalan et al. 2008	42	18-30	Hombres sanos	Masa corporal, edad, género, tiempo, FC (***)	0,76	5
Widrick 1992	Akalan et al. 2008	145	--	Hombres sanos	Masa corporal, edad, género, tiempo, FC (***)	0,91	5,26
Bonen 1979	Akalan et al. 2008	100	7 a 15	Hombres	FC, VCO_2 , VO_2 , edad (**)	0,95	0,17
Metz 1971	Akalan et al. 2008	60	12 a 13	Hombres	FC, RER, VO_2 (***)	0,7	--
Metz 1971	Akalan et al. 2008	60	14-15	Hombres	FC, VO_2 , RER (***)	0,48	3,8
Hermiston 1971	Akalan et al. 2008	28	25-45	Hombres	Edad, FC, CO_2 , RER	0,9	--

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

5. Conclusiones

La frecuencia cardíaca de recuperación es un indicador válido para estimar el consumo máximo de oxígeno, sobretodo cuando es post-ejercicio submáximo. Sin embargo, se debe 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 frecuencia cardíaca de recuperación post-ejercicio submáximo es inversamente proporcional al VO_2 máx. Por lo tanto un supuesto es que también la frecuencia cardíaca de recuperación post-ejercicio submáximo en otros ergómetros como cintas rodantes, remoergómetros u otras formas de ejecución como el nado también sea inversamente proporcional al consumo máximo de oxígeno.

6. Referencias

- Achten, J. & Jeukendrup, E. (2003). Heart rate monitoring applications and limitations. *Sports Medicine*, 33(7), 517-538. Disponible en <http://web.ebscohost.com>
- Ainsworth, B., McMurray, R. & Veazey, S. (1997). Prediction of peak oxygen uptake from submaximal exercise test in older men and women. *Journal of Ageing and Physical Activity*, 5, 27-38. Disponible en <http://web.ebscohost.com>
- Akalan, C., Robergs, R. & Kravitz, L. (2008). Prediction of VO_2 máx from an individualized submaximal cycle ergometer protocol. *Journal of Exercise Physiology*, 11(2), 1-17. Disponible en <http://web.ebscohost.com>
- Arena, R., Arrowood, J., Fei, D., Shelar, S., Helm, S. & Kraft, K. (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. doi:10.1111/j.1600-0838.2009.00883.x

Barak, O., Jakovljevic, D., Popadic, J., Ovcin, Z., Brodie, D. & Grujic, N. (2010). Heart rate variability before and after cycle exercise in relation to different body positions. *Journal of Sport Science and Medicine*, 9, 176-182. Disponible en <http://web.ebscohost.com>

Borresen, J. & Lambert, M. (2008). Autonomic control of heart rate during and after exercise. *Sport Med*, 38(8), 633-646. Disponible en <http://web.ebscohost.com>

Buchheit, M., Duché, P., Laursen, P. & 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. doi:10.1139/H09-140

Buono, M., Roby, J., Micale, F., Sallis, J. & Shepard, E. (1991). Validity and reliability of predicting maximum oxygen uptake via field test in children and adolescents. *Pediatric Exercise Science*, 3, 250-255. Disponible en <http://web.ebscohost.com>

Carmouche, D., Bubein, R., & Kay, N. (1998). The effect of maximum heart rate on oxygen kinetics and exercise performance at low and high workloads. *Pace*, 21, 679-686. Disponible en <http://web.ebscohost.com>

Chatterjee, S., Chatterjee, P., Mukherjee, P. y Bandyopadhyay, A. (2004). Validity of Queen's College step test for use with young Indian men [Exclusivo en línea]. *British Journal Sports Medicine*. Recuperado el 27 de junio de 2011, de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1724834/pdf/v038p00289.pdf>

Chatterjee, S., Chatterjee, P. Y Bandyopadhyay, A. (2005). Validity of Queen's College Step Test for estimation of maximum oxygen uptake in female students [Exclusivo en línea]. *Indian Journal of Medical Research*. Recuperado el 30 de junio de 2011, de <http://medind.nic.in/iby/t05/i1/ibyt05i1p32.pdf>

Chen, S., Wang, J., Lee, W., Hou, C., Chen, C., Laio, Y.,... & Kuo, C. (2006). Validity of the 3 min step test in moderate altitude: environmental temperature as a confounder. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 31, 726-730. doi:10.1139/H06-077

Darby, L. & Marsh, J. (2007). Specificity of a maximal step exercise test. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*, 11(3), 131-148. Disponible en <http://web.ebscohost.com>

Darby, L. & Pohlman, R. (1999). Prediction of max VO₂ for women: adaptation of the Fox cycle ergometer protocol. *Journal of Exercise Physiology*, 2(4) 1-8. Disponible en www.g-se.com

Karavirta, L., Tulppo, M., Nyman, K., Laaksonen, D., Pullinen, T., Laukkanen, R.,... & 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. doi:10.1007/s00421-007-0667-5

Keytel, L., Goedecke, J., Noakes, T., Hiiloskorpi, H., Laukkanen, R., Van der Merwe, L. & Lambert, V. (2005). Prediction of energy expenditure from heart rate monitoring during submaximal exercise. *Journal of Sport Sciences*, 23(3), 289-297. doi:10.1080/02640410470001730089

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. Disponible en <http://web.ebscohost.com>

Lai, N., Nasca, M., Silva, M., Silva, F., Whipp, B & Cabrera, M. (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. doi:10.1139/H07-154

Lamberts, R., Lemmink, K., Durandt, J., & Lambert, M. (2004). Variation in heart rate during submaximal exercise: implications for monitoring training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18(3), 641-645. Disponible en <http://web.ebscohost.com>

Lamberts, R., Swart, J., Noakes, T. & Lambert, M. (2009). Changes in heart rate recovery after high-intensity training in well-trained cyclists. *European Journal of Applied Physiology*, 105, 705-713. doi:10.1007/s00421-008-0952-y

Lambrick, D. Faulkner, J. Rowlands, A. & Eston, R. (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. doi:10.1007/s00421-009-1093-7

Leite, P., Melo, R., Mello, M., Da Silva, E., Borghi-Silva, A. e Catai, A. (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. Disponible en <http://web.ebscohost.com>

Lubans, D., Morgan, P., Callister, R. & Collins, C. (2008). The relationship between pedometer step counts and estimated VO₂ máx. as determined by a submaximal fitness test in adolescents. *Pediatric Exercise Science*, 20, 273–284. Disponible en <http://web.ebscohost.com>

Lubans, D., Morgan, P., Collins, C., Boreham, C. & Callister, R. (2009). The relationship between heart rate intensity and pedometer step counts in adolescents. *Journal Sport Sciences*, 27(6), 591-597. doi:10.1080/02640410802676687

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. doi:10.1007/s00421-008-0804-9

McArdle, W., Katch, F. & Katch, V. (1990). *Fisiología del ejercicio: energía, nutrición y rendimiento humano* (2a ed.). Madrid, España: Alianza Deporte.

Noordhof, D., Koning, J. & Foster, C. (2010). The maximal accumulated oxygen deficit method. *Sports Medicine*, 40(4), 285-302. Disponible en <http://web.ebscohost.com>

Robergs, R. & 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. Disponible en <http://web.ebscohost.com>

Souza, M., Lima, A., Silva, J., Silva, G., Pontes, L. & Lira, F. (2007). Cardiac frequency and blood pressure in different loads in the cirilo's ergometer step in the active women. *Fitness Preformance*, 6(3), 156-161. doi:10.3900/fpj.6.3.156.e

Stathokostas, L., Kowalchuk, J., Petrella, R., & Paterson, D. (2009). Moderate and heavy oxygen uptake kinetics in postmenopausal women. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 34, 1065-1072. doi:10.1139/H09-107

Xu, F. & Rhodes, E. (1999). Oxygen uptake kinetics during exercise. *Sport Meds*, 27(5), 313-327. Disponible en <http://web.ebscohost.com>

Yoshida, T., Abe, D., Fukuoka, Y. & Hughson, R. (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. doi:10.1080/10913670701715133

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. Disponible en <http://web.ebscohost.com>