Article

¿El VO2max que Medimos es Realmente Máximo?

Inaian P. Teixeira, Bruno P. C. Smirmaul[1] y Danilo R. Bertucci[1,2]

[1]*Department of Physical Education, Sao Paulo State University (UNESP), Rio Claro, Brazil*
[2]*Department of Physiological Sciences, Federal University of Sao Carlos (UFSCAR), Sao Carlos, Brazil*

INTRODUCCIÓN

El consumo de oxígeno máximo (VO_{2max}) puede ser definido como la capacidad máxima integrada de los sistemas pulmonar, cardiovascular y muscular para captar, transportar y utilizar O_2, respectivamente (Poole et al, 2008). Generalmente se determina mediante un test de ejercicio incremental en cinta rodante o en bicicleta ergométrica, y el test de VO_{2max} se ha transformado en una piedra angular en los temas de fisiología clínica y aplicada relacionados al ejercicio físico. Sus aplicaciones son numerosas y puede ser aplicado en atletas de élite o hasta en individuos con varias condiciones patológicas (Mancini et al, 1991; Bassett y Howley, 2000). A pesar de haber sido estudiado durante aproximadamente un siglo, los interrogantes con respecto al VO_{2max} todavía son fuente de debate y discordancia en la literatura (Noakes, 1998; Bergh et al, 2000; Levine, 2008; Ekblom, 2009; Noakes y Marino, 2009; Spurway et al., 2012). En particular, el estudio de los métodos de medición del VO_{2max} es un campo de investigación que plantea desafíos a través de los años (Midgley et al, 2007, 2008). Los resultados intrigantes publicados recientemente (Beltrami et al., 2012; Mauger y Sculthorpe, 2012) han generado un debate adicional con respecto a la medición del *verdadero* valor de VO_{2max} y sus mecanismos de limitación/regulación. En este artículo describiremos brevemente los métodos actuales de evaluación y los mecanismos de limitación/regulación del VO_{2max}, y discutiremos los nuevos resultados de estos dos estudios recientes y sus posibles implicaciones en el campo.

Mediciones Actuales y Mecanismos de Limitación/Regulación del VO_{2max}

Uno de los conceptos más populares utilizados para obtener el VO_{2max} durante un test de ejercicio incremental es la presencia de un *plateau* (meseta). El origen de este concepto tiene su base en los estudios realizados hace 90 años por Hill y Lupton (1923), quienes propusieron la existencia de una intensidad de ejercicio individual por encima de la cual no se produce aumento en el VO_2 y que representa el límite de la capacidad cardiorrespiratoria. Sin embargo, la necesidad de la presencia del *plateau* en la determinación de VO_{2max} tiene limitaciones, porque contrasta con el hecho de que su aparición no es universal (Doherty et al, 2003; Astorino et al, 2005). Con el propósito resolver este problema y asegurar que los individuos siempre alcancen las condiciones "máximas" al final de un test de ejercicio incremental, alcanzando el verdadero valor de VO_{2max}, se volvió popular el uso de parámetros fisiológicos como criterio para la interrupción de los tests de ejerciciobasados en la tasa de intercambio respiratorio, frecuencia cardíaca máxima y las respuestas del lactato sanguíneo (Poole et al, 2008). Sin embargo, cuando estos parámetros se utilizan como criterio para la determinación de VO_{2max}, pueden subestimar hasta en un 26% el valor medido real (Poole et al., 2008). Finalmente, la solución actual propuesta para la determinación del VO_{2max} cuando no se produce el plateau, es el uso del VO_2pico que parece ser un índice consistente de VO_{2max}, siempre y cuando se realice un test de ejercicio constante supramáximo después del test incremental, denominado "fase de verificación" (Day et al., 2003; Midgley y Carroll, 2009).

En la actualidad, se discuten dos modelos teóricos principales en la literatura que intentan explicar los mecanismos de limitación y/o regulación del VO_{2max}. El modelo clásico propone que el VO_{2max} está limitado por la capacidad máxima del

corazón de proporcionar O_2 a los músculos, lo que significa que cuando uno localiza el VO_{2max} el sistema cardiovascular está trabajando al límite (Ekblom, 2009). Alternativamente, los otros modelos postulan que el sistema cardiovascular nunca alcanza un límite de trabajo, y que el VO_{2max} está regulado y no limitado, por el número de unidades motoras reclutadas en las extremidades que están realizando ejercicios, los cuales son siempre submáximos (Noakes y Marino, 2009). Así, este modelo propone que siempre existe una reserva fisiológica, tanto cardiovascular como neuromuscular, mientras que el número de unidades motoras reclutadas por los músculos activos durante el ejercicio está regulado por el cerebro para prevenir una falla masiva en los sistemas corporales (Noakes y Marino, 2009).

El VO_{2max} que Medimos ¿Es Realmente Máximo?

Independientemente de los mecanismos de limitación/regulación del VO_{2max} (Ekblom, 2009; Noakes y Marino, 2009), se cree uno obtiene los verdaderos valores de VO_{2max} implementando criterios específicos durante el test de ejercicio incremental como la duración (Midgley et al, 2008), presencia de la "fase de verificación" (Day et al, 2003; Midgley y Carroll, 2009), y tasa de adquisición de muestras de VO_2 (Astorino, 2009). Sien embargo, dos estudios recientes, han desafiado estas creencias.

El primer estudio (Mauger y Sculthorpe, 2012) comparó un test de ejercicio incremental convencional (es decir, con incrementos de carga fijos hasta el agotamiento voluntario) con un test de ejercicio incremental máximo realizado por los sujetos a su propio ritmo regulado por la percepción individual de esfuerzo. La duración total del último fue l0 min, distribuido en 5 fases de 2 min cada una en las que los individuos controlaron la intensidad del ejercicio en cada momento con el fin de alcanzar percepciones individuales de esfuerzo de 11, 13, 15, 17, y 20, respectivamente, en la escala de Borg de 15 puntos. Notablemente, este test incremental máximo realizado al propio ritmo produjo VO_{2max} significativamente mayores (~ 8%; Figura 1 A) que los valores encontrados durante un test de ejercicio incremental convencional (Mauger y Sculthorpe, 2012).

El segundo estudio (Beltrami et al, 2012) comparó un test de ejercicio incremental convencional con un protocolo de disminución (es decir, niveles decrecientes de intensidad del ejercicio a lo largo del tiempo). Este protocolo de disminución comenzó con la velocidad utilizada durante la "fase de verificación" del test incremental lo que equivale a 1 km h^{-1} más rápido que la última fase lograda durante test de ejercicio convencional. Esta intensidad se mantuvo en el 60% del tiempo individual que los sujetos pudieron tolerar durante la "fase de verificación ", con una reducción subsecuente en la velocidad de 1 km h^{-1} durante 30 s y reducciones consecutivas de 0,5 km h^{-1} en las cuales cada fase se mantuvo por 30, 45, 60, 90, y 120 s, respectivamente. Al igual que el test incremental máximo realizado al propio ritmo (Mauger y Sculthorpe, 2012), el test decremental propuesto produjo un VO_{2max} significativamente mayor (4,4%; Figura 1B) en comparación con el test de ejercicio incremental convencional (Beltrami et al. ,2012).

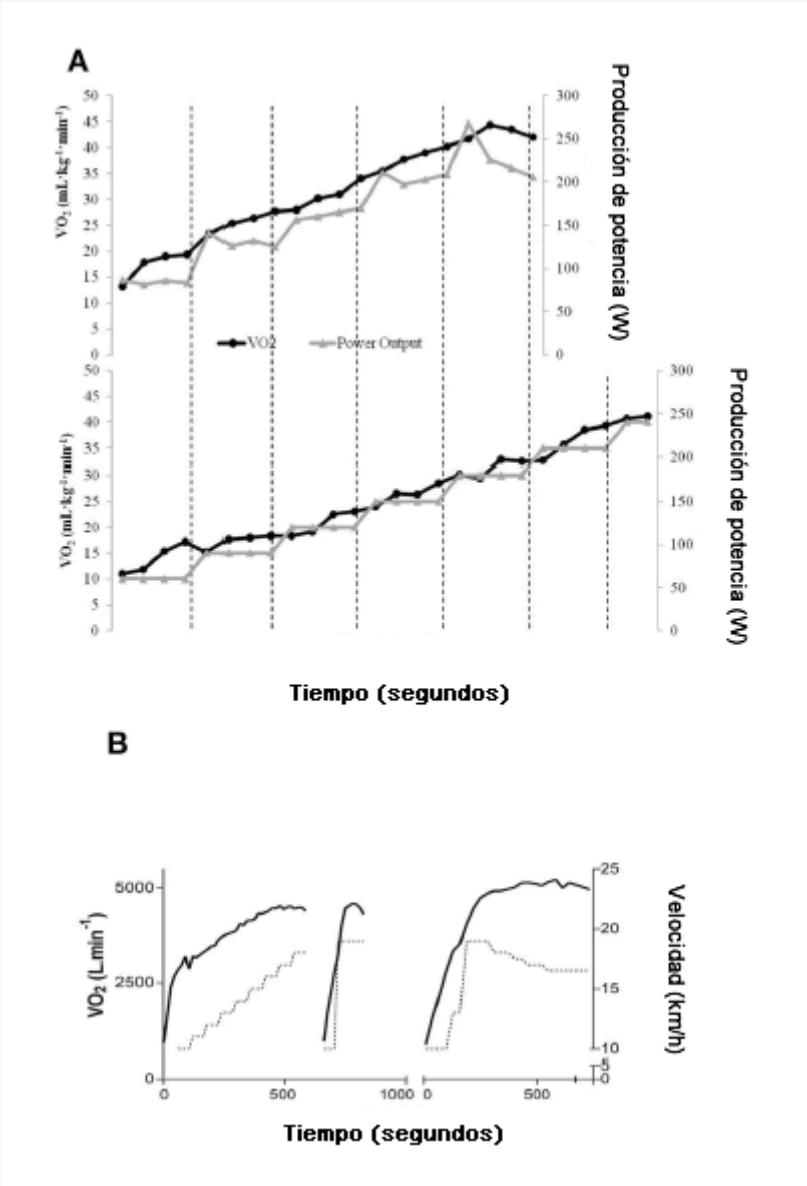


Figura 1. *(A) Datos de VO_2 y de producción de potencia del protocolo incremental realizado al propio ritmo (arriba) y del protocolo incremental convencional (abajo) en un sujeto representativo. Un VO_{2max} más alto (media grupal ~ 8%) se alcanzó el protocolo incremental realizado al propio ritmo durante el trabajo submáximo. (B) Datos de VO_2 y de velocidad para el test incremental convencional (izquierda) + fase de verificación (medio) y para el protocolo de disminución (derecha) en un sujeto representativo. Con el protocolo de disminución se alcanzó durante el trabajo submáximo un VO_{2max} mayor (media grupal aprox. 4,4%). El VO_2 se representa mediante las líneas sólidas y la velocidad se representa mediante las líneas discontinuas. Extraído de Mauger y Sculthorpe (2012) y Beltrami et al. (2012) con autorización de BMJ Publishing Group S.A.*

La explicación principal sugerida por los autores para los resultados encontrados en el primer estudio (Mauger y Sculthorpe, 2012) es que la naturaleza del protocolo de ejercicios realizados al propio ritmo puede haber permitido una producción de potencia mas alta para el mismo nivel de percepción de esfuerzo o incomodidad, lo que permitiría alcanzar un VO_{2max} mayor antes del agotamiento voluntario. Esto ocurrió a pesar de que los valores de frecuencia cardíaca, ventilación y tasa de intercambio respiratorio fueron similares a los del protocolo convencional. Factores adicionales como una mayor contribución relativa de las fibras de tipo I dependientes de oxígeno con una consecuente reducción en el componente anaeróbico del test, y/o un aumento en la demanda y utilización de oxígeno debido a la elevada producción de potencia en la última etapa del test incremental realizado al propio ritmo, también podrían haber contribuido con el mayor valor de VO_{2max} encontrado (Mauger y Sculthorpe, 2012). Es importante destacar que ya se han planteado críticas a este estudio (Chidnok et al, 2013). Al mismo tiempo los autores del segundo estudio (Beltrami et al., 2012) sugieren que diferencias en la percepción de trabajo anticipatoria de los protocolos, creciente en el test incremental convencional y decreciente en el test de disminución, podría haber afectado las regulaciones simpáticas o parasimpáticas y podría haber

producido diferentes respuestas metabólicas frente al ejercicio y al mayor VO_{2max}. Sorprendentemente, ambos estudios demostraron que tanto individuos desentrenados (Mauger y Sculthorpe, 2012), como individuos entrenados (Beltrami et al., 2012) alcanzaron el mayor valor de VO_{2max} durante los trabajos submáximos, lo que contradice el concepto tradicional que afirma que el VO_{2max} se produce con trabajos máximos.

Implicaciones de los Nuevos Resultados

Una vez reconocido y corroborado que los métodos de medición del VO_{2max} habituales (es decir, el protocolo de ejercicio incremental convencional) proporcionan, de hecho, el valor submáximo, cuales serían las implicaciones de los nuevos valores *verdaderos* de VO_{2max} encontrados (Beltrami et al, 2012; Mauger y Sculthorpe, 2012) para el cuerpo existente de conocimiento relacionado a este área? En nuestra opinión, una porción considerable del conocimiento científico se vería levemente afectado, debido a la existencia de error sistemático. Por ejemplo, los estudios que tenían el objetivo de verificar el efecto de intervenciones específicas en el VO_{2max} ya tienen subestimaciones de VO_{2max} agregadas en sus resultados. Dado que los valores pre intervención y post intervención se miden mediante el mismo protocolo, los efectos de la intervención en los valores del VO_{2max} aún estarían medidos correctamente, a pesar de la subestimación del *verdadero* valor de VO_{2max}. En contraste, los estudios basados en los porcentajes de VO_{2max}, como la zona de entrenamiento aeróbico para la aptitud cardiorrespiratoria, por ejemplo, qué habitualmente varía alrededor de 50 y 85% del VO_{2max}, tendrían su rango de intervalo desplazado hacia la derecha. Igualmente, sería necesario revisar las ecuaciones indirectas para estimar VO_{2max}, dado que las mismas utilizan valores de referencia del VO_{2max} que según los nuevos resultados (Beltrami et al., 2012; Mauger y Sculthorpe, 2012), son submáximos. No obstante, sabiendo la magnitud de la subestimación del VO_{2max} por los protocolos incrementales convencionales, las ecuaciones matemáticas podrían proporcionar correcciones a posteriori, para reducir/corregir tales inexactitudes.

Contrariamente al impacto relativamente menor descripto anteriormente, los resultados de un VO_{2max} mayor al encontrado normalmente con tests de ejercicio incremental convencionales no concuerdan con los modelos teóricos propuestos para explicar sus mecanismos de limitación/regulación (Ekblom, 2009; Noakes y Marino, 2009). Si los valores de VO_{2max} encontrados hasta ahora con los tests incrementales convencionales están limitados por la capacidad máxima del corazón de proporcionar O_2 a los músculos (Ekblom, 2009), ¿cómo podemos explicar este aumento (Beltrami et al, 2012; Mauger y Sculthorpe, 2012)? Nosotros identificamos dos posibilidades. El modelo teórico puede ser todavía correcto, lo que significa que el VO_{2max} está efectivamente limitado por la capacidad máxima del corazón, a pesar de que, los valores de VO_{2max} encontrados durante los tests incrementales convencionales no son verdaderamente máximos, y los protocolos alternativos podrían ser capaces de aumentarlo. Por el contrario, el modelo estaría equivocado en afirmar que el VO_{2max} está principalmente limitado por la capacidad cardíaca, y podría existir otro mecanismo para explicar su limitación/regulación. El otro modelo teórico (Noakes y Marino, 2009), a su turno, tampoco concuerda con los resultados. ¿Si el cerebro para de prevenir el fracaso catastrófico en los sistemas corporales regula el número de unidades motoras reclutadas durante el ejercicio regulando el VO_{2max} que se puede alcanzar, por qué permitiría el cerebro a los individuos alcanzar con estos dos nuevos protocolos valores de VO_{2max} mayores que los alcanzados durante los tests incrementales convencionales (Beltrami et al, 2012; Mauger y Sculthorpe, 2012)? ¿No debería el cerebro, basado en la retroalimentación aferente de los diferentes sistemas, regular el número de unidades motoras reclutada de manera similar, independientemente del protocolo del ejercicio realizado?

Una posible explicación para los resultados recientes puede ser obtenida volviendo a la propuesta de Jones y Killian (2000), quiénes revisaron la evidencia para demostrar que, en lugar de limitaciones basadas en los mecanismos capacidad de entrega de oxígeno, las limitaciones cardiorrespiratorias y de ejercicio se basan en los síntomas. Estos autores, considerando los datos de percepciones periféricas y centrales de esfuerzo, destacaron la importancia de considerar estos síntomas como factores limitantes cuando se mide el rendimiento físico y el VO_{2max} (Jones y Killian, 2000). Un modelo teórico reciente enfatiza la importancia superior del esfuerzo en el rendimiento, la regulación y la tolerancia de ejercicios de resistencia (Marcora y Staiano, 2010; Smirmaul et al, 2013). Los mayores valores de VO_{2max} alcanzados (Beltrami et al, 2012; Mauger y Sculthorpe, 2012) pueden haber estado asociados con respuestas perceptuales alteradas debido a las diferencias en los protocolos usados. Sin embargo, esta posibilidad sigue siendo especulativa.

CONCLUSIÓN

Las propuestas de diferentes protocolos de ejercicio que producen valores de VO_{2max} mayores a los que se obtienen normalmente durante los test de ejercicio incremental convencionales deben interesar a la comunidad de fisiólogos del deporte y del ejercicio. Al mismo tiempo que tales resultados afectan ligeramente una porción considerable de los conocimientos, también desafían a los modelos teóricos para explicar la limitación/regulación de VO_{2max}. Además, también

ponen en duda el concepto de que VO_{2max} ocurre en el trabajo máximo. Si bien trabajos recientes han demostrado que es posible mantener un *plateau* convencional en el VO_{2max} hasta por 15 min disminuyendo la carga de trabajo de los individuos, lo que significa durante el trabajo submáximo (Petot et al, 2012; Billat et al, 2013), no se sabe si lo mismo es posible para los valores superiores de VO_{2max} encontrados (Beltrami et al, 2012; Mauger y Sculthorpe, 2012). La sugerencia que los valores de VO_{2max} son tarea-dependientes, y que el test de ejercicio incremental convencional no produce los verdaderos valores máximos es atractiva. Sin embargo, comprender cómo estos nuevos protocolos de ejercicio producen valores mayores de VO_{2max}, como es la influencia de los diferentes protocolos en las respuestas perceptuales y mediciones de VO_{2max}, determinar sus implicaciones y aplicaciones generales y cuales son los mecanismos de limitación/regulación específicos que sustentan el VO_{2max}, son nuevos horizontes que los científicos del deporte y ejercicio pueden explorar.

REFERENCIAS

1. Astorino, T. A. (2009). Alterations in VOmax and the VO plateau with manipulation of sampling interval. *Clin. Physíol. Funct. Imaging 29, 60-67.* doi: 10.HH/j.1475-097X.2008.00835.x
2. Astorino, T. A., Willey, J., Kinnahan, J., Larsson, S. M., Welch, H., and Dalleck, L. C. (2005). Elucidating determinants of the plateau in oxygen consumption at V02max. *Br. J. Sports Med. 39, 655-660. discussion: 660.*
3. Bassett, D. R., and Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med. Sci. Sports Exerc. 32, 70-84.*
4. Beltrami, F. G., Froyd, C, Mauger, A. R., Metcalfe, A. J., Marino, E, and Noakes, T. D. (2012). Conventional testing methods produce submaximal values of maximum oxygen consumption. *Br. J. Sports Med. 46, 23-29.* doi: 10.1136/bjsports-2011-090306
5. Bergh, U., Ekblom, B., and Astrand, P. O. (2000). Maximal oxygen uptake "classical" versus "contemporary" viewpoints. *Med. Sci. Sports Exerc. 32, 85-88.*
6. Billat, V., Petot, H., Karp, J. R., Sarre, G., Morton, R. H., and Mille-Hamard, L. (2013). The sus-tainability of V02max: effect of decreasing the workload. *Eur. J. Appl. Physiol. 113, 385-394.* doi: 10.1007/s00421-012-2424-7
7. Chidnok, W., Dimenna, F. J., Bailey, S. J., Burnley, M., Wilkerson, D. P., Vanhatalo, A., et al. (2013). V02max is not altered by self-pacing during incremental exercise: reply to the letter of Alexis, R. *Mauger. Eur. J. Appl. Physiol. 113, 543-544.* doi: 10.1007/s00421-012-2563-x
8. Day, J. R., Rossiter, H. B., Coats, E. M., Skasick, A., and Whipp, B. J. (2003). The maximally attainable V02 during exercise in humans: the peak vs. *maximum issue./. Appl. Physiol. 95, 1901-1907.*
9. Doherty, M., Nobbs, L., and Noakes, T. D. (2003). Low frequency of the "plateau phenomenon" during maximal exercise in elite British athletes. *Eur. i. Appl. Physiol. 89, 619-623.* doi: 10.1007/s00421-003-0845-z
10. Ekblom, B. (2009). Counterpoint: maximal oxygen uptake is not limited by a central nervous system governor. */. Appl. Physiol. 106, 339-341. Discussion: 341-342.*
11. Hill, A. V., and Lupton, H. (1923). Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilization of oxygen. *Q. /. Med. 16, 135-171.* doi: 10.1093/qjmed/os-16.62.135
12. Jones, N. L., and Killian, K. J. (2000). Exercise limitation in health and disease. *N. Engl. J. Med. 343, 632-641.* doi: 10.1056/NEJM200008313430907
13. Levine, B. D. (2008). V02max: what do we know, and what do we still need to know. */. Physiol. 586, 25-34.* doi: 10.1113/jphysiol.2007. 147629
14. Mancini, D. M., Eisen, H., Kussmaul, W., Mull, R., Edmunds, L. H., and Wilson, J. R. (1991). Value of peak exercise oxygen consumption for optimal timing of cardiac transplantation in ambulatory patients with heart failure. *Circulation 83, 778-786.* doi: 10.1161/01.CIR.83.3.778
15. Marcora, S. M., and Staiano, W. (2010). The limit to exercise tolerance in humans: mind over muscle. *Eur. J. Appl. Physiol. 109, 763-770.* doi: 10.1007/s00421-010-1418-6
16. Mauger, A. R., and Sculthorpe, N. (2012). A new V02max protocol allowing self-pacing in maximal incremental exercise. *Br. J. Sports Med. 46, 59-63.* doi: 10.1136/bjsports-2011-090006
17. Midgley, A. W., Bentley, D. J., Luttikholt, H., McNaughton, L. R., and Millet, G. P. (2008). Challenging a dogma of exercise physiology: does an incremental exercise test for valid VO 2 max determination really need to last between 8 and 12 minutes. *Sports Med. 38, 441-447.* doi: 10.2165/00007256-200838060-00001
18. Midgley, A. W., and Carroll, S. (2009). Emergence of the verification phase procedure for confirming "true" VO2max). *Scand. J. Med. Sci. Sports 19, 313-322.* doi: l0.111/j.1600-0838.2009. 00898.x
19. Midgley, A. W., McNaughton, L. R., Polman, R., and Marchant, D. (2007). Criteria for determination of maximal oxygen uptake: a brief critique and recommendations for future research. *Sports Med. 37, 1019-1028.* doi: 10.2165/00007256-200737120-00002
20. Noakes, T. D. (1998). Maximal oxygen uptake: "classical" versus "contemporary" viewpoints: a rebuttal. *Med. Sci. Sports Exerc. 30, 1381-1398.*
21. Noakes, T. D., and Marino, F. E. (2009). Point: maximal oxygen uptake is limited by a central nervous system governor. */. Appl. Physiol. 106, 338-339. Discussion: 341.*
22. Petot, H., Meilland, R., Le Moyec, L., Mille-Hamard, L., and Billat, V. L. (2012). A new incremental test for V02max accurate measurement by increasing V02max plateau duration, allowing the investigation of its limiting factors. *Eur. J. Appl.*

Physiol. 112, 2267-2276. doi: 10.1007/s00421-011-2196-5
23. Poole, D. C, Wilkerson, D. P., and Jones, A. M. (2008). Validity of criteria for establishing maximal O2 uptake during ramp exercise tests. *Eur. J. Appl. Physiol. 102, 403-410.* doi: 10.1007/s00421-007-0596-3
24. Smirmaul, B. P. C, Dantas, J. L., Nakamura, F. Y., Pereira, G. (2013). The psych obi ologi cal model: a new explanation to intensity regulation and (in)tolerance in endurance exercise. *Rev. Bras. Educ. Fis. Esporte. 27, 333-340.*
25. Spurway, N. C, Ekblom, B., Noakes, T. D., and Wagner, P. D. (2012). What limits [V(-)]0(2max). *A symposium held at the BASES Conference, 6*

Cita Original

Smirmaul BPC, Bertucci DR and Teixeira IP. Is the VO2max that we measure really maximal? Front. Physiol. 4:203. 2013. doi: 10,3389ifphys.2013,00203