

COMPONENTE LENTO DEL CONSUMO DE OXÍGENO

*D. Alfredo Santalla Hernández
Licenciado en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte. UEM
Profesor de Fisiología en la Universidad Alfonso X El Sabio*

RESUMEN

El incremento en el consumo de oxígeno (VO_2) que ocurre en ejercicios prolongados a carga constante se conoce como Componente Lento del VO_2 . A pesar de su justificada importancia tanto en el rendimiento en deportes de resistencia como a la hora de planificar el entrenamiento de resistencia, es el gran olvidado por la valoración fisiológica de los deportistas en el laboratorio. Este artículo trata de abordar el concepto y mecanismos responsables de este fenómeno y de justificar la valoración y utilización del mismo por parte de los entrenadores en la planificación de entrenamiento de resistencia.

Palabras clave: Componente lento del VO_2 , economía de carrera, valoración fisiológica, rendimiento, resistencia.

INTRODUCCIÓN

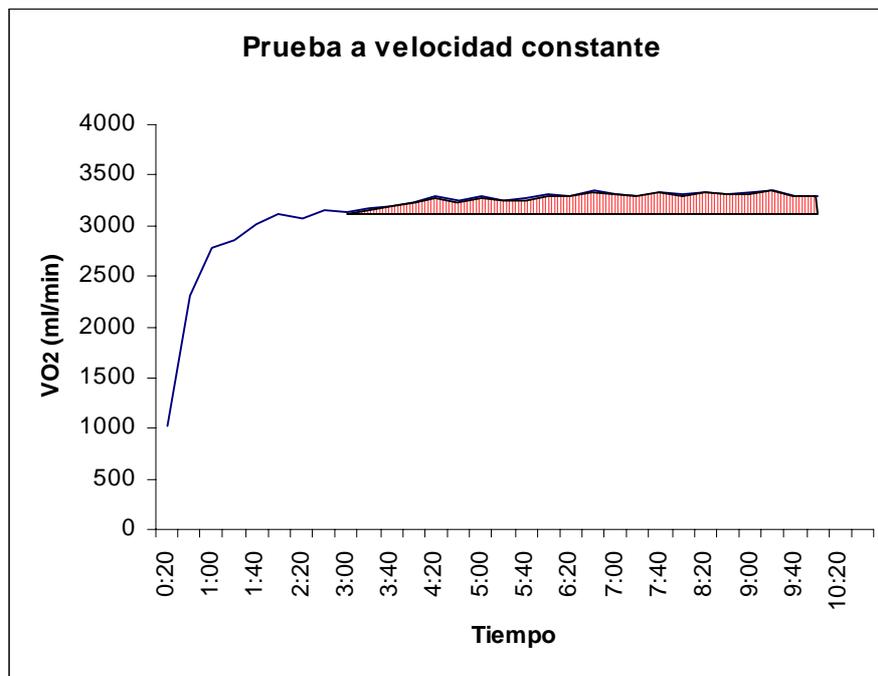
La cinética del consumo de oxígeno o VO_2 en pruebas con carga constante está ampliamente descrito por la literatura (Whipp y Wasserman 1972; Poole y cols. 1988; Henson y cols. 1989; Poole y cols. 1991; Poole y Richardson 1997; Xu y Rhodes 1999). Dicho comportamiento depende si la intensidad de ejercicio implica o no cierto grado de acidosis metabólica, o expresado de otro modo, de si es inferior o superior a la de su umbral láctico o LT (Whipp y Wasserman 1972; Poole y cols. 1988; Henson y cols. 1989; Poole y cols. 1991; Poole y Richardson 1997; Xu y Rhodes 1999):

En ejercicios a cargas constantes que impliquen intensidades por debajo del umbral láctico, el VO_2 muestra un aumento mono exponencial desde el principio del ejercicio, hasta alcanzar un estado estable en aproximadamente 3 minutos, llamado "Componente Rápido del VO_2 " (Paterson y Whipp 1991; Poole y cols. 1991; Poole y Richardson 1997; Xu y Rhodes 1999).

Durante la realización de ejercicios a cargas constantes que impliquen intensidades por encima del umbral

láctico LT, los autores han descrito la existencia de un segundo componente en la cinética del VO_2 , que aparece tras un aumento exponencial e inicial, y que impide alcanzar un estado estable (Whipp y Wasserman 1972; Linnarsson 1974; Pool y cols. 1988; Poole y cols. 1994; Xu y Rhodes 1999). En ocasiones este aumento puede llegar a ser de hasta 1 litro por minuto ($l \cdot \text{min}^{-1}$), pudiendo alcanzar el consumo máximo de oxígeno $VO_{2\text{max}}$ en caso de no interrumpir el ejercicio (Casaburi y cols. 1987; Roston y cols. 1987; Poole y cols. 1988).

Este segundo componente, más lento y posterior al inicial, que aparece en pruebas de cargas constantes superiores al umbral láctico, ha sido denominado "Componente Lento del VO_2 ". De forma operativa, los autores lo han definido como la diferencia o variación del consumo de oxígeno existente entre el tercer minuto y el final del ejercicio realizado a intensidad constante (Casaburi y cols. 1987; Roston y cols. 1987; Poole y cols. 1991; Capelli y cols. 1993; Barstow 1994; Whipp 1994).



Comportamiento del VO₂ de un atleta de medio fondo en una prueba con una carga constante del 90% VO₂max de la prueba incremental. Los tres primeros minutos (sin rallar) representa el componente rápido del VO₂ y el área rallada representa el componente lento del VO₂.

Este aumento de VO₂ supone un coste adicional de O₂ mayor de lo previsto por la relación entre el consumo de oxígeno y la potencia (VO₂/W) existente a intensidades menores del LT (Whipp y Wasserman 1972; Henson y cols. 1989; Paterson y Whipp 1991; Poole y cols. 1994; Xu y Rhodes 1999), y por tanto expresa una cierta pérdida de eficiencia locomotora (al necesitar más oxígeno para mantener esa misma intensidad). Por esta razón, el componente lento del VO₂ medido entre los minutos 3 y 6 puede ser, desde un buen indicativo de la participación anaeróbica en la producción de energía (Whipp y Wasserman 1972), hasta un índice del nivel de tolerancia al ejercicio físico (Poole y cols. 1988), y debería ser tenido en cuenta a la hora de programar el entrenamiento (Jacobsen y cols. 1998) ya que modifica la intensidad de trabajo inicialmente prevista. Este aumento progresivo del VO₂ en cargas constantes superiores al LT nos obliga también a reflexionar sobre la posibilidad de que, por encima de dicho LT, no existan "intensidades constantes". Por esta razón creemos más acertado utilizar el término "carga constante".

Mecanismos responsables del componente lento del VO₂.

A pesar de que los mecanismos que provocan el componente lento del VO₂ permanecen todavía sin aclarar, los estudios sugieren una gran variedad de factores así como su participación relativa en el control del componente lento del VO₂. Estos factores, responsables en mayor o menor medida del componente lento del VO₂, se pueden clasificar según su origen en factores de carácter central y periférico:

A.- Los mecanismos de origen central sugeridos son:

1) El trabajo de la musculatura cardiorrespiratoria (ven-

tilación o VE) (Shepard 1966; Hagberg y cols. 1978; Casaburi y cols. 1987; Yoshida y cols. 1992; Gaesser 1994b; Womack y cols. 1995; Lucía y cols. 2000).

2) El aumento de la temperatura (Hagberg y cols. 1978; Poole y cols. 1991; Koga y cols. 1997).

B.- Los mecanismos de origen periférico sugeridos son:

1) Ácido láctico (Whipp y Wasserman 1973; Casaburi y cols. 1987; Roston y cols. 1987; Poole 1991; Yoshida y cols. 1992; Capelli y cols. 1993; Barstow 1994; Stringer y cols. 1995; Womack y cols. 1995; Yoshida y cols. 1995; Barstow y cols. 1996).

2) Adrenalina (Epinefrina) (Gaesser y cols. 1994; Womack y cols. 1995).

3) Potasio (Yahuda y cols. 1992; Yoshida y cols. 1995).

4) Disminución en la eficiencia del ciclo excitación-contracción (E-C) (Poole y cols. 1991; Poole y cols. 1994; Whipp 1994; Willis y Jackman 1994).

5) El reclutamiento de fibras tipo II (Poole y cols. 1991; Coyle y cols. 1992; Shinohara y Moritani 1992; Barstow 1994; Whipp 1994; Barstow y cols. 1996; Lucía y cols. 2000).

Entre los numerosos estudios que otorgan un predominio periférico (musculatura activa) al origen del componente lento del VO₂ (Poole y cols. 1991; Poole 1991; Coyle y cols. 1992; Yoshida y cols. 1995; Barstow y cols. 1996; Billat y cols. 1998 y 1999) destacan los realizados por Poole y cols. en 1991 y Yoshida y cols. en 1995. Tanto Poole y cols. mediante la correlación entre el VO₂ pulmonar y el VO₂ de las piernas (temporalmente similares), como Yoshida y cols. 1995 mediante la comparación cinética de VO₂, frecuencia cardíaca (FC) y ventilación (VE) en pedá-

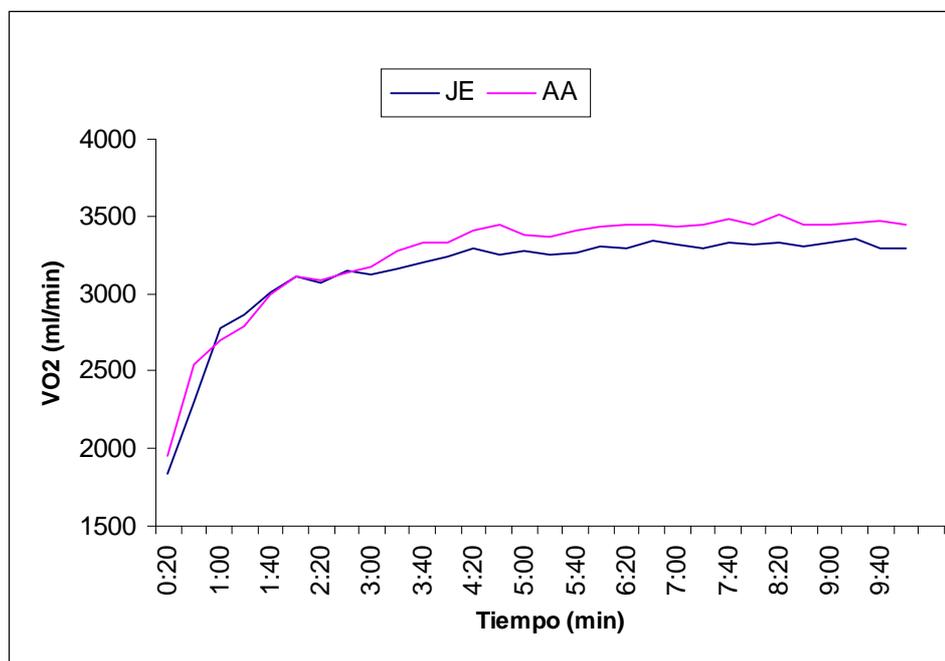
leo con alternancia de piernas, demuestran que la mayoría del componente lento del VO_2 se origina en los músculos activos. La cinética de las fibras musculares, el reclutamiento de nuevas fibras por pérdida de eficiencia de las ya funcionantes o el metabolismo muscular de las extremidades activas son los posibles factores propuestos.

Existe un número considerable de estudios que apuntaban al ácido láctico como responsable del VO_2 (Whipp y Wasserman 1973; Casaburi y cols. 1987; Roston y cols. 1987; Poole 1991; Yoshida y cols. 1992; Capelli y cols. 1993; Barstow 1994; Stringer y cols. 1995; Womack y cols. 1995; Yoshida y cols. 1995; Barstow y cols. 1996). Esto quizás se deba a la utilización del entrenamiento como método para relacionar el ácido láctico con el componente lento del VO_2 (Casaburi y cols. 1987; Yoshida y cols. 1992; Womack y cols. 1995). En estos estudios los autores describen un descenso en el componente lento del VO_2 tras periodos de entrenamiento a intensidades constantes mayores de LT de entre 6 y 8 semanas. Descensos que se acompañan de menores tasas de ventilación (Casaburi y cols. 1987; Womack y cols. 1995), epinefrina (Womack y cols. 1995), y por supuesto ácido láctico (Casaburi y cols. 1987; Yoshida y cols. 1992; Womack y cols. 1995). Además observan como la variación del componente lento del VO_2 es muy rápida (2 semanas) (Womack y cols. 1995). Por esta razón atribuyen ese descenso de VO_2 lento al descenso de la concentración plasmática de lactato provocado por el entrenamiento. De hecho encuentran correlación entre ellos (Casaburi y cols. 1987). Pero Womack y cols. En 1995 describen como el descenso del componente lento se estabiliza tras la 2ª semana, mientras que el del ácido láctico continúa más tiempo, por lo que otorgan importancia al ácido láctico en el componente lento, pero no como principal causante del mismo. Tras el periodo de entrenamiento, la

inyección de epinefrina que provocó aumentos de VE y ácido láctico sin variar el VO_2 confirmaron sus sospechas. Debía por tanto existir otra adaptación del entrenamiento aeróbico que mejorase el componente lento del VO_2 .

En este sentido, la pérdida de eficiencia química en el ciclo excitación-contracción de la célula muscular y el reclutamiento de fibras tipo II que esto provoca, ha sido la teoría que sobre el origen del componente lento del VO_2 más importancia ha cobrado últimamente (Coyle y cols. 1992; Green y Patla 1992; Poole y cols. 1994; Willis y Jackaman 1994; Billat y cols. 1998 y 1999; Xu y Rhodes 1999). Así una alteración de la eficiencia en el ciclo E-C, provocaría un reclutamiento de fibras tipo II como estrategia para minimizar la glucólisis en la producción de energía, reduciendo la fatiga, la alteración en la E-C y la pérdida de fuerza (Green y Patla 1992). Este reclutamiento, acentúa la participación de las fibras tipo II, que son menos eficientes (Willis y Jackman 1994) y que por tanto necesitan consumir más oxígeno para mantener la misma intensidad de trabajo. Este mayor consumo de oxígeno necesario para mantener una cierta carga o velocidad constante implica una pérdida en la economía de carrera ($VO_2 \cdot vel^{-1}$) (Williams y Cavanagh 1987; Xu y Montgomery 1995; Millet y cols. 2000) por lo que cuanto más entrenado este un individuo, mejor economía de carrera mostrará, con la posible mejora en el rendimiento que esto implica.

Diferencias en economía de carrera entre dos sujetos. En la gráfica se aprecia como, pese tener similares VO_{2max} , JE 3416 $ml \cdot min^{-1}$ ($58,3 ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) y AA 3662 $ml \cdot min^{-1}$ ($58,1 ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$), e idéntica velocidad de 90% del VO_{2max} ($18,31 km \cdot h^{-1}$), el componente lento del VO_2 difiere en ambos, provocando una diferencia en la economía de carrera durante el transcurso de la prueba a dicha velocidad.





Realización de una prueba a velocidad constante con análisis de gases para la cuantificación del componente lento del VO_2 en el Laboratorio de Fisiología del Ejercicio de la Universidad Europea de Madrid.

Importancia del componente lento del VO_2 en la valoración fisiológica del deportista.

A la hora realizar la valoración fisiológica de un deportista en el laboratorio el protocolo estandarizado consiste en una prueba incremental analizando la respuesta fisiológica de los diferentes parámetros ergoespirméticos (consumo de oxígeno, producción de CO_2 , ventilación, equivalentes ventilatorios, tiempos de inspiración/espiración, etc.), metabólicos (ácido láctico, pH, saturación de hemoglobina) y cardiovasculares (frecuencia cardíaca). Esto permite conocer la eficiencia de sus sistemas orgánicos a diferentes intensidades de ejercicio y cuantificar el grado de desarrollo que hemos conseguido con el entrenamiento (no olvidemos que el entrenamiento físico consiste en someter al deportista a estímulos crónicos o repetidos, llamados también cargas de entrenamiento, para provocar unas adaptaciones fisiológicas que le permitan mejorar en una capacidad física). El protocolo incremental también permite cuantificar los valores máximos de los diferentes parámetros (tan importantes para el rendimiento en deportes de resistencia como el Consumo Máximo de Oxígeno o VO_{2max}) y detectar los umbrales aeróbico y anaeróbico, muy útil para el entrenamiento y relacionados en mayor o menor medida con el rendimiento en diferentes deportes. Sin embargo en las valoraciones fisiológicas de deportistas (incluidos de alto rendimiento) no suelen realizarse pruebas a carga o velocidad constante, por lo que no se mide (ni se le otorga la importancia que en muchos deportes tienen) la economía de carrera y el componente lento del VO_2 . Es muy útil medir el grado máximo de funcionamiento de los sistemas energéticos (potencia aeróbica máxima) pero no menos importante es medir (en periodos largos de tiempo o incluso hasta la extenuación) el comportamiento de estos sistemas energéticos a veloci-

dades similares a las de competición, así como la disminución en el rendimiento de los mismos provocado por la fatiga.

CONCLUSIÓN

Debido a que el entrenamiento físico no sólo provoca incrementos en el VO_{2max} y en el umbral anaeróbico sino que también disminuye el componente lento del VO_2 , y la economía de carrera, y teniendo en cuenta que este componente lento puede considerarse como un índice de tolerancia a la intensidad de ejercicio (Poole y cols. 1988) que provoca una pérdida en la economía de carrera, influyendo de forma negativa en el rendimiento en ejercicios continuados a intensidades medias y altas sería muy útil incluir pruebas a carga constante para la valoración del componente lento del VO_2 además de la estandarizada prueba de esfuerzo incremental en la valoración fisiológica del deportista y la planificación de su entrenamiento deportivo.

BIBLIOGRAFIA



- Barstow TJ (1994) Characterization of VO_2 kinetics during heavy exercise. *Med Sci Sports Exerc* 26(11): 1327 – 1334.
- Barstow TJ, Jones AM, Nguyen PH y Casaburi R (1996) Influence of muscle fiber type and pedal frequency on oxygen uptake kinetics of heavy exercise. *J Appl Physiol* 81(4):1642-1650.
- Billat VL, Richard R y Binsse VM (1998) The VO_2 slow component for severe exercise depends on type of exercise and is not correlated with time to fatigue. *J Appl Physiol* 85(6):2118-2124.

- Billat VL, Mille-Hamad L, Petit B y Koralsztejn JP (1999) The role of cadence on the VO_2 slow component in cycling and running in triathletes. *Int J Sports Med* 20:329-437.
- Capelli C, Antonutto G, Zamparo P, Girardis M y di Prampero PE (1993) Effects of prolonged cycle ergometer exercise on maximal muscle power and oxygen uptake in humans. *Eur J Appl Physiol* 66:189-195.
- Casaburi R, Storer TW, Ben-Dov I y Wasserman K (1987) Effect of endurance training on possible determinants of VO_2 during heavy exercise. *J Appl Physiol* 62(1):199-207.
- Coyle EF, Sidossis LS, Horowitz JF y Beltz JD (1992) Cycling efficiency is related to the percentage of type I muscle fibers. *Med Sci Sports Exerc* 24(7):782-788.
- Gaesser GA, Ward SA, Baum VC y Whipp BJ (1994) Effects of infused epinephrine on slow phase of O_2 uptake kinetics during heavy exercise in humans. *J Appl Physiol* 77(5):2413-2419.
- Gaesser GA (1994b) Influence of endurance training and catecholamines on exercise VO_2 response. *Med Sci Sports Exerc* 26(11):1341-1346.
- Green HJ y Patla AE (1992) Maximal aerobic power: neuromuscular and metabolic considerations. *Med Sci Sports Exerc* 24(1):38-46.
- Hagberg JM, Mullin JP y Nagle FJ (1978) Oxygen consumption during constant-load exercise. *J Appl Physiol* 45(3):381-384.
- Henson LC, Poole DC y Whipp BJ (1989) Fitness as a determinant of oxygen uptake response to constant-load exercise. *Eur J Appl Physiol Occ Physiol* 59:21-28.
- Jacobsen DJ, Coast R y Donnelly JE (1998) The effect of exercise intensity on the slow component of VO_2 in persons of different fitness levels. *J Sports Med Phys Fitness* 38:124-131.
- Koga S, Shiojiri T, Kondo N y Barstow TJ (1997) Effect of increased muscle temperature on oxygen uptake kinetics during exercise. *J Appl Physiol* 83(4):1333-1338.
- Linnarsson D (1974) Dynamics of pulmonary gas exchange and heart rate changes at start and end of exercise. *Acta Physiol Scand (Suppl)* 425:1-68.
- Lucía A, Hoyos J y Chicharro JL (2000) The slow component of VO_2 in professional cyclists. *Br J Sports Med* 34:367-374.
- Paterson DH y Whipp BJ (1991) Asymmetries oxygen uptake transients at the on and offset of heavy exercise in humans. *J Physiol* 443:575-586.
- Poole DC, Ward SA, Gardner GW y Whipp BJ (1988) Metabolic respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. *Ergonomics* 9:1265-1279.
- Poole DC (1991) Role of exercising muscle in slow component of VO_2 . *Med Sci Sports Exerc* 26(11):1335-1340.
- Poole DC, Barstow TJ, Gaesser GA, Willis WT y Whipp BJ (1994) VO_2 slow component: Physiological and functional significance. *Med Sci Sports Exerc* 26(11):1354-1358.
- Poole DC y Richardson R (1997) Determinants of oxygen uptake; implications for exercise testing. *Sports Med* 24 (5): 306-320.
- Roston WL, Whipp BJ, Davis JA, Cunningham DA, Effros M y Wasserman K (1987) Oxygen uptake kinetics and lactate concentration during exercise in humans. *Am Rev Respir Dis* 135:1080-1084.
- Shepard RJ (1966) The oxygen cost of breathing during vigorous exercise. *Q J Exp Physiol Cog Med Sci* 51:336-350.
- Shinohara M y Moritani T (1992) Increase in neuromuscular activity and oxygen uptake during heavy exercise. *Ann Physiol Anthropol* 11:257-262.
- Stinger W, Wasserman K y Casaburi R (1995) The Vco_2/Vo_2 relationship during heavy, constant work rate exercise reflects the rate of lactic acid accumulation. *Eur J Appl Physiol* 72:25-31.
- Whillis WT y Jackman MR (1994) Mitochondrial function during heavy exercise. *Med Sci Sports Exerc* 26(11):1347-1354.
- Whipp BJ y Wasserman K (1972) Oxygen uptake kinetics for various intensities of constant-load work. *J Appl Physiol* 33(3):351-356.
- Whipp BJ (1994) The slow component of O_2 uptake kinetics during heavy exercise. *Med Sci Sports Exerc* 26(11):1319-1326.
- Womack CJ, Davis SE, Blumer JL, Barrett E, Weltman AL y Gaesser GA (1995) Slow component of O_2 uptake during heavy exercise: adaptation to endurance training. *J Appl Physiol* 79(3):838-845.
- Xu F y Rhodes EC (1999) Oxygen uptake kinetics during exercise. *Sports Med* 27:313-327.
- Yasuda Y, Ishida K y Miyamura M (1992) Effects of blood gas, pH, lactate, potassium on the oxygen uptake courses during constant load-bicycle exercise. *Jpn J Physiol* 42:223-237.
- Yoshida T, Udo M, Ohmori T, Matsumoto Y, Uramoto T y Yamamoto K (1992) Day - to - Day changes in oxygen uptake kinetics at the onset of exercise during strenuous endurance training. *Eur J Appl Physiol* 64:78-83.
- Yoshida T, Kamiya J y Hishimoto K (1995) Are oxygen uptake kinetics at the onset of exercise speeded up by local metabolic status in active muscles?. *Eur J Appl Physiol* 70:482-486.

Autor para establecer correspondencia:
D. Alfredo Santalla Hernández
 alfredosh@wanadoo.es

