

Monograph

# ¿Podemos Estudiar de Manera Confiable la Cinética del $VO_2$ en Jóvenes?

Neil Armstrong y Samantha G Fawkner

*Children's Health and Exercise Research Centre, School of Sport and Health Sciences, University of Exeter, UK.*

## RESUMEN

---

El estudio de la cinética del  $VO_2$  ofrece la posibilidad de estudiar de manera no invasiva la respuesta metabólica y cardiorrespiratoria al ejercicio y las limitaciones para realizar las actividades cotidianas. Su naturaleza no invasiva, hace que sea muy atractivo para utilizarlo tanto en jóvenes sanos como en aquellos que padecen alguna enfermedad, y aunque la literatura continúa creciendo respecto a los adultos, en esta población especial (niños) todavía existen relativamente pocas investigaciones. Es probable que esto se deba a que las dificultades metodológicas en torno al estudio de la cinética del  $VO_2$  en jóvenes, no aparecen o aparecen en menor grado cuando se trata de adultos. Este artículo revisa estas cuestiones metodológicas y explica los principales procedimientos que podrían utilizarse para superarlos.

**Palabras Clave:** niños, cinética del oxígeno, metodología

## INTRODUCCION

---

Desde el hallazgo de la naturaleza exponencial de la respuesta del consumo de oxígeno ( $VO_2$ ) al comienzo del ejercicio (Hill y Lupton, 1923), ha habido un progreso importante hacia la comprensión de la verdadera naturaleza de la respuesta de la cinética del  $VO_2$  y en los últimos 20 o 30 años, ha habido una enorme cantidad de intentos por manipular esta respuesta, con el objetivo de explorar la fisiología muscular y la fisiología cardiorrespiratoria. Actualmente, con sólo buscar por la frase "cinética del consumo de oxígeno", en una base de datos adecuada, nos encontramos con una amplia gama de artículos que utilizan la cinética del  $VO_2$  para estudiar cuestiones desde la fisiología del músculo más básica, hasta la respuesta al ejercicio en poblaciones con alguna enfermedad. En la actualidad, la cinética del  $VO_2$  es una constante preocupación de los científicos del ejercicio.

La principal atracción para estudiar la cinética del  $VO_2$ , es que con la correcta aplicación e interpretación, lo no invasivo brinda información acerca de la actividad metabólica a nivel muscular, y la respuesta integrada al ejercicio de la ventilación, del sistema cardiovascular y del sistema metabólico. Esta característica "no invasiva" es esencial para su utilización en el estudio de la respuesta al ejercicio bajo numerosas situaciones y bajo condiciones de ejercicio y no sólo eso, sino que también es muy útil cuando se trabaja con niños. En esta población especial, donde el uso de técnicas invasivas ha sido considerado, durante mucho tiempo no-ético; es muy atractiva la oportunidad para utilizar la cinética del  $VO_2$  para comprender el grado de desarrollo de la fisiología del ejercicio.

Puede resultar sorprendente, que con el crecimiento en torno a la investigación focalizada a la respuesta cinética del  $VO_2$ ,

existan tan pocos estudios que investiguen e interpreten ésta respuesta en niños.

Históricamente, las pruebas estándar de laboratorio que se consideran válidas para los adultos, luego de algunas modificaciones, son adoptadas por los pediatras fisiólogos del ejercicio. Como resultado, la literatura es rica con datos pertenecientes al estado estable y a los períodos de ejercicio exhaustivo en niños. Sin embargo, aunque son datos útiles y brindan información, este tipo de ejercicio no se correlaciona demasiado con las necesidades cardiorrespiratorias de las actividades cotidianas de un niño, y más específicamente, con las necesidades de un niño que padece alguna enfermedad. Para esto, necesitamos ser capaces de investigar la respuesta dinámica al ejercicio, y el análisis de la respuesta (transitoria) del  $\text{VO}_2$  al ejercicio nos da esta información. Desafortunadamente quizás sea esta naturaleza transitoria, la verdadera razón, por la que existan tan pocos datos pertenecientes a los niños.

Esta breve revisión, discute algunas de metodologías que se utilizan para evaluar la respuesta cinética del  $\text{VO}_2$  en niños, y posteriormente intenta que los lectores adopten esta herramienta analítica con esta población, con total confianza. No es el objetivo de este artículo describir de manera extensa la respuesta de la cinética del  $\text{VO}_2$  al ejercicio, discutir los mecanismos teóricos de control o discutir qué se conoce actualmente con respecto a la respuesta cinética en niños; se sugiere a los lectores que no están muy familiarizado con estos conceptos, que consulten otras revisiones que contiene más detalles sobre estos temas (Fawkner y Armstrong, 2003, Gaesser y Poole, 1996, Jones y Poole, 2005, Tschakovsky y Hughson, 1999).

### **Síntesis de la Respuesta Cinética del $\text{VO}_2$ al Ejercicio**

En los adultos, y hasta cierto punto en los niños, la naturaleza de la respuesta cinética ha sido identificada según la intensidad relativa del ejercicio. Al comienzo del ejercicio de moderada intensidad (por debajo del umbral anaeróbico ( $T_{AN}$ , (Wasserman et al, 1994)) la fase cardiodinámica (fase 1) que es independiente del consumo de oxígeno muscular ( $Q_{O_2}$ ) es seguida por un incremento exponencial observable en el  $\text{VO}_2$  (fase 2) hacia un estado estable (fase 3) y el costo del oxígeno en relación a la tasa de trabajo en adultos (y probablemente en niños) es de aproximadamente de  $10 \text{ mL O}_2 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ . Cuando se realiza ejercicio a una intensidad por encima del  $T_{AN}$  y por debajo de la potencia crítica (CP, Moritani, 1981), a una elevada intensidad, se atrasa el estado estable del  $\text{VO}_2$  y un componente lento adicional del  $\text{VO}_2$  causa un eventual estado estable elevado y una elevación en el costo de oxígeno del ejercicio (Poole et al, 1988). Por encima de la CP a una intensidad muy elevada, el  $\text{VO}_2$  continúa incrementándose casi linealmente, y el componente lento genera el eventual logro del  $\text{VO}_{2\text{pico}}$ . En los ejercicios muy intensos, donde el  $\text{VO}_2$  proyectado es mayor que el pico, la respuesta es truncada por alcanzar rápidamente el  $\text{VO}_{2\text{pico}}$  en minutos (Whipp y Mahler, 1980).

Se cree que el incremento del  $\text{VO}_2$  durante la fase 2, se puede explicar con una función lineal en relación a la intensidad del ejercicio, esto está claro en intensidades de ejercicio moderadas. Esto es, la magnitud de la respuesta es proporcional al estímulo, pero la tasa de cambio es constante en todas las intensidades del ejercicio. Lo que es muy interesante, es la tasa de este cambio, ya que mientras más rápido sea el incremento hasta el estado estable, menor será el déficit de  $\text{O}_2$  y menor el gasto de las fuentes de recursos energéticos agotables. Los mecanismos que controlan esta respuesta han sido el centro de una disputa, aunque la literatura sugiera que está dirigido en primera medida por el potencial de músculo para utilizar  $\text{O}_2$ , con un número de factores adicionales involucrados (Tschakovsky y Hughson, 1999). Con intensidades mayores al  $T_{AN}$ , aunque la característica exponencial de la fase 2 se mantiene, no está confirmada la influencia de la intensidad del ejercicio sobre la tasa de cambio a intensidades de ejercicio elevadas y muy elevadas. Aunque la evidencia es controversial (Burnley et al, 2000, Tschakovsky y Hughson, 1999) es posible que a estas intensidades elevadas de ejercicio, el transporte de  $\text{O}_2$ , pueda tener un rol más importante en la adaptación del  $\text{VO}_2$  (Grassi et al, 2000). Todavía no está claro cual es la fuente del costo adicional de  $\text{O}_2$  durante el ejercicio en la fase 3 a intensidades mayores al  $T_{AN}$  (por ejemplo, el componente lento). Los consensos actuales refutan la relación causal con la producción de lactato (Poole et al, 1991, Womack et al, 1995), y prefieren una dependencia con la distribución del tipo de fibra y el reclutamiento (Barstow et al, 1996, Gaesser y Poole, 1996, Poole et al, 1994) con una amplia gama de otros factores posibles (Gaesser y Poole, 1996).

Autor	Sexo	N	Edad	Protocolo	Intervalo de Muestreo	Método de cuantificación	Nº de transiciones	Intervalo de confianza	Constante de Tiempo (t, s)
Freedson et al. (1981)	M	28	10.2(2.3)	BL - 49W	20s	t½	1		34.8 (127)
Sady et al. (1983)	M	21	10.2(2.3)	BL - 42% VO <sub>2</sub> max	15s	t½	1		18.5 (.75)
Cooper et al. (1984)	M M F F	37 21 24 27	10 (2) 16 (1) 9 (2) 15 (2)	Protocolo en rampa	BB	MRT para el protocolo en rampa	1		43 (15)
Cooper et al. (1985)	M F	5 5	8 (1) 9 (1)	Pausa - 75% TVent	BB	Modelo 1, t > 20s	6		26.5 (3.0) 26.5 (4.0)*
Springer et al. (1991)	M+F	9	8.2 (1.4)	Pausa - 80% TVent	BB	Modelo 2, t > 15s	5		23.9 (4.6)
Zanconato et al. (1991)	M+F	10	9.0 (1.3)	BL - 80% TVent	BB	1min t½	1		23.0 (5.3)
Armon et al. (1991)	M+F	6	6-12	BL - 80% TVent	BB	Modelo 1, t > 0s	1		26 (8)*
Hamar et al. (1991)		18	14.1 (6)	Pausa - 65% pico	BB	Modelo 2, t > fase 1	1		20.2 (5.9)
Hebestreit et al. (1998)	M	9	11.1(1.2)	20W-50% VO <sub>2</sub> pico	BB	Modelo 2, t > fase 1	4		22.8 (5.1)
Obert et al. (2000)	M+F	23	10-13	BL - 80% TLac	BB	Modelo 4, t > fase 1	1		24.9 (6.6)
Williams et al. (2001)	M	8	12.2 (.2)	Pausa - 80% - TLac	BB	Modelo 5	4		10.2 (1.0)
Fawkner y Armstrong (2002b)	M F	11 12	11.6 (.3) 11.7 (.4)	BL - 80% TVent	BB	Modelo 1, t > 0s	4-10	τ < ± 5s	29.5(3.9)** 30.9 (4.5)*
Fawkner y Armstrong (2002b)	M F	11 12	11.6 (.3) 11.7 (.4)	BL - 80% TVent	BB	Modelo 1, t > 15s	4-10	τ < ± 5s	29.0 (3.9)** 30.5 (3.9)*
Fawkner y Armstrong (2002b)	M F	11 12	11.6 (.3) 11.7 (.4)	BL - 80% TVent	BB	Modelo 2, t > 0s	4-10	τ < ± 5s	25.9 (3.3)** 27.8 (4.2)*
Fawkner y Armstrong (2002b)	M F	11 12	11.6 (.3) 11.7 (.4)	BL - 80% TVent	BB	Modelo 2, t > 15s	4-10	τ < ± 5s	19.0 ± 2.0** 21.0 ± 5.5*

**Tabla 1.** Metodologías para determinar la respuesta cinética del VO<sub>2</sub> en ejercicios de moderada intensidad en niños. Abreviaturas: BL = intensidad inicial de pedaleo; TVent = umbral ventilatorio; TLac = umbral de lactate; t = constante tiempo.

Autor	Sexo	N	Edad	Protocolo	Intervalo de muestreo	Método de cuantificación	Nº de transiciones	Intervalo de confianza
Robinson (1938)	M	8	6.0	Cinta hasta el agotamiento	30s	% of peak VO <sub>2</sub> after 30s	1	
Máček y Vávra (1977)	M	10	10	Cinta hasta el agotamiento	30s	% of peak VO <sub>2</sub> after 30s	1	
Máček y Vávra (1980)	M	10	10-11	Bicicleta hasta el agotamiento	30s	% of peak VO <sub>2</sub> after 30s	1	
Sady (1981)	M	21	10.2 (.3)	Bicicleta - 110% VO <sub>2</sub> máx	15s	t ½	1	
Zanconato et al. (1991)	M+F	10	9.0 (1.3)	BL - 50% Δ BL - 100% VO <sub>2</sub> pico BL - 125% VO <sub>2</sub> pico	BB	1min t½	1	
Armon et al. (1991)	M+F	6	6-12	BL - 25% Δ BL - 50% Δ BL - 75% Δ	BB	Modelo 4, δ <sub>1</sub> = δ <sub>2</sub> , t > 0s	1	
Obert et al. (2000)	M+F	23	10-13	BL - 90% potencia max	BB	Modelo 4, t > fase 1	1	
Williams et al (2001)	M	8	12 (.2)	Potencia - 50% Δ	BB	Modelo 5, t > 0s	2	
Hebestreit et al (1998)	M	9	11.1 (1.2)	20W-100% VO <sub>2</sub> pico 20W - 130% VO <sub>2</sub> pico	BB	Modelo 2, t > fase 1	2	
Fawkner y Armstrong (2004c)	M	13	10.6 (.3)	BL - 40% TVent	BB	Modelo 2, fase 1 < t < inicio del SC	3-4	τ < ± 5s A1 < ± 5%
Fawkner y Armstrong (2004a)	M	25	10.6 (.3)	BL - 40% TVent	BB	Modelo 2, fase 1 < t < inicio del SC	3-4	Promedio τ , 4.3 ± 1.3s Promedio A1, 3.0 ± 1.3 %

**Tabla 2.** Metodologías para determinar la respuesta de la cinética del VO<sub>2</sub> para intensidades de ejercicio intensas y muy intensas en niños. Abreviaturas: BL = intensidad inicial de pedaleo; Δ = diferencia entre el umbral anaeróbico y el VO<sub>2</sub> pico; TVent = umbral ventilatorio; t = constante tiempo; A1 amplitud primaria; para los detalles de los modelos, ver el texto.

## Cuantificando con Presión la Respuesta de la Cinética del VO<sub>2</sub>

El objetivo de cuantificar la respuesta de la cinética del VO<sub>2</sub>, es evaluar la velocidad y la magnitud de la respuesta, la mayoría de las veces, se trata de una onda cuadrada en la transición de intensidades de ejercicio ya sea en una ergometría realizada en bicicleta o en cinta. Esto se puede alcanzar utilizando una regresión no lineal y procedimientos de adecuación reiterativos y adecuando un modelo específico a los datos disponibles lo mejor posible, a través de la elección de la línea de mejor ajuste reduciendo el error residual (en los remitos del modelo especificado). Para alcanzar esto: a) se debe conocer la intensidad del ejercicio, entonces b) se puede predecir el patrón de la respuesta y se puede aplicar un modelo apropiado a la los datos que deben c) tener una gran resolución temporal para aplicar cualquier modelo dado con d) la relación señal-ruido, la cual es suficientemente buena para tener confianza en los parámetros de la respuesta. A continuación se ampliará sobre cada uno de estos requerimientos.

1. Dado que la amplitud y el patrón de la respuesta de la cinética del VO<sub>2</sub> varía según la intensidad de ejercicio, realizar comparaciones válidas intra e inter estudio, requiere que los sujetos ejerciten a la misma intensidad en relación a los marcadores de intensidad T<sub>AN</sub> (moderada intensidad) y CP (intensidad elevada). Sin embargo, para estudiar la respuesta al ejercicio de moderada intensidad, algunos estudios con niños, han establecido la intensidad del ejercicio en relación al VO<sub>2</sub>pico o han hecho cumplir una intensidad específica de ejercicio en todos los sujetos (ver Tabla 1). Esto es problemático ya que el T<sub>AN</sub> varía de manera considerable entre los niños en cuanto a un porcentaje del VO<sub>2</sub>pico, el cual ocurre especialmente debido al método por el cual se detecta el T<sub>AN</sub> y la reproducibilidad, confiabilidad y validez del método. Es más apropiado establecer la intensidad del ejercicio como un porcentaje del T<sub>AN</sub>, ya que aporta alguna garantía de que los sujetos estén al menos en una intensidad cercana uno del otro, lo cual es suficiente para realizar comparaciones válidas, debido a la linealidad de la respuesta.

Se ha estudiado muy poco la respuesta cinética al ejercicio en niños a intensidades mayores al  $T_{AN}$  con parámetros de intensidad definidos cuidadosamente. La mayoría de los estudios determinaron la respuesta a ejercicios a intensidades máximas y supramáximas; y muy pocos estudios intentaron determinar la existencia o la magnitud del componente lento del  $VO_2$  en niños (Tabla 2). Esto se puede deber a que la prueba para la determinación del umbral del ejercicio de alta intensidad, es decir la CP, demanda mucho esfuerzo por parte del sujeto y mucho tiempo; y hasta donde investigó el autor, sólo una vez se reportó esta determinación en niños (Fawkner y Armstrong, 2002a). Como resultado, los que han intentado investigar la respuesta al ejercicio de alta intensidad, han establecido intensidades de ejercicio como un porcentaje de la diferencia entre el  $T_{AN}$  y el  $VO_{2pico}$ . En niños de doce años de edad, se considera que el 40% de la diferencia ( $40\% \Delta$ ) se encuentra debajo de la CP (Fawkner y Armstrong, 2002a) y cae cuando se trata de ejercicios de alta intensidad.

2. Se han propuesto una gran cantidad de modelos para representar el patrón de la respuesta cinética, definiendo la intensidad del ejercicio ya sea de manera genérica o bien detallada. Originalmente, se consideró que la velocidad de la respuesta a cualquier intensidad de ejercicio podría ser determinada con el tiempo que toma alcanzar la mitad del  $VO_{2pico}$  logrado durante la prueba de ejercicio (el  $t^{1/2}$ , ver Tablas 1 y 2). Sin embargo, éste método no es capaz de observar la naturaleza exponencial de la repuesta, por lo cual posteriormente se introdujo la constante tiempo ( $\tau$ ), la cual representa el tiempo empleado en alcanzar el 63% del cambio del  $VO_2$  desde el nivel inicial hasta el estado estable ( $\Delta VO_2$ ), y aplicando el modelo 1 (ver anexo).

Este modelo permite un cálculo monoexponencial para que sea adecuado para los datos del inicio del ejercicio (por ejemplo cuando el tiempo = 0), y la constante tiempo se refiere generalmente al tiempo medio de la respuesta (MRT). Sin embargo, como se ha identificado con anterioridad, la respuesta de la fase 1 tiene una duración de 10-20 segundos y es independiente del  $Q_{O_2}$ , la cual solo es evidente en la boca luego del retraso por el tránsito músculo- pulmón. Por lo tanto hay una demora de tiempo antes de que el  $VO_2$  sea representativo del incremento exponencial en  $Q_{O_2}$ . Para tener en cuenta esto, se puede incluir un tiempo de retraso en el modelo (modelo 2, ver anexo) y los datos de la fase 1 pueden ser eliminados del proceso de realización del modelo. Aunque el MRT, no permite necesariamente la determinación exacta de la cinética del  $Q_{O_2}$ , provee un parámetro útil con el cual se puede determinar el déficit de  $O_2$  en ejercicio de moderada intensidad, el cual es producto de el incremento del  $VO_2$  durante la transición ( $\Delta VO_2$ ) y el MRT.

Como se puede visualizar claramente en la Tabla 1, se han utilizado una gran variedad de modelos para analizar la respuesta del ejercicio de moderada intensidad en niños, y el efecto que esto tiene en los parámetros de la respuesta es más evidente cuando se aplican varios modelos a los mismos datos (Fawkner y Armstrong, 2002b). Este estudio, que utiliza diferentes técnicas de elaboración de modelos con niños, confirma al igual que en los adultos, que la mejor manera de describir la respuesta al ejercicio de moderada intensidad, es utilizando un sólo exponencial y término de retraso luego de la fase 1 (modelo 2, ver anexo).

Esta situación se complica cuando se trata del ejercicio de alta intensidad. La verdadera naturaleza de la respuesta, específicamente el componente lento, todavía no está totalmente clara. A pesar de esto, algunos autores han elegido el componente lento como un exponencial adicional (modelos 3, ver anexo) sugiriendo que representa un componente emergente retrasado y lento más que uno que emerge en sincronía con el componente primario al inicio de la fase 2. De este modo, el modelo incluye dos exponenciales cada uno con un término de retraso independiente y dos amplitudes que representan la amplitud del componente primario y del lento. Con este modelo, el retraso secundario ( $\delta_2$ ) ha sido interpretado como el tiempo del inicio del componente lento. Otros autores han elegido el componente lento como un término lineal (modelo 4, ver anexo), el cual tiene solo alguna justificación a intensidades de ejercicio mayores a la CP ya que, a estas intensidades el  $VO_2$  incrementa rápidamente hacia el  $VO_{2pico}$ .

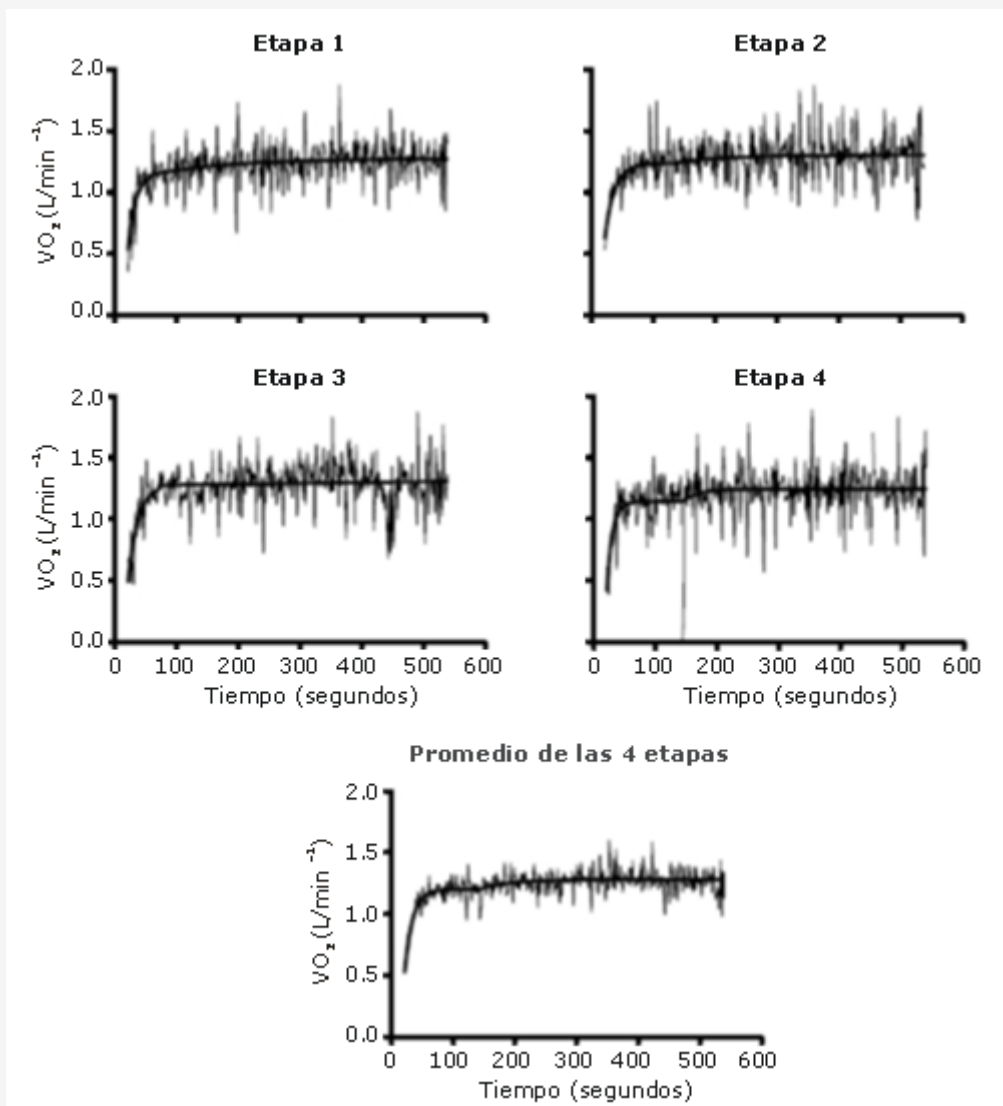
A pesar de la amplia utilización de estos modelos (en adultos y en niños) a diferencia del componente primario de la fase 2, demostrar el componente lento ya sea de manera exponencial o lineal, no tiene ninguna confirmación fisiológica. De hecho, los intentos por combinar modelos con el componente primario y el lento en un solo modelo, pueden negar la precisión con la cual se estiman la constante primaria del tiempo y la amplitud (ver más abajo). Esta preocupación es mayor cuando se fuerza a un modelo para que se adecue a una serie de datos para el que el patrón básico de la repuesta no cumple. En el caso de adecuarse un doble exponencial, este es frecuentemente el caso si está claro o no el componente lento, o si su incremento es más parecido a una función lineal que a una exponencial (ver Tabla 3 y Figura 1, etapa 3 para tener un ejemplo).

Etapa	Parámetros de la respuesta						Intervalos de confianza	
	A1 (L·min <sup>-1</sup> )	δ1 (s)	τ1 (s)	A2 (L·min <sup>-1</sup> )	δ2 (s)	τ2 (s)	τ1 (s)	A1 (%)
1	0.96	16.2	11.3	0.13	68.1	117.1	7.0	5.5
2	0.94	14.3	15.7	0.07	130.0	83.6	6.7	4.3
3	1.03	16.6	16.2	>1000.00	70.0	>1000.0	4.7	2.9
4	0.92	18.8	9.1	0.10	145.0	24.5	13.3	4.3
Promedio	0.96	16.5	13	0.08	144.0	41.3	2.7	2.1

**Tabla 3.** Modelo 3 parámetros de la respuesta para una serie de etapas de ejercicio de alta intensidad para un niño de 11 años. A1, y A2, τ1 y τ2 y δ1 y δ2, amplitudes, constantes de tiempo y retraso de tiempo de cada exponencial respectivamente.

Como resultado, los autores están intentando identificar objetivamente el inicio del componente lento, mostrar los datos del componente primario de manera independiente y reportar la amplitud del componente lento con respecto al VO<sub>2</sub> al final del ejercicio (Fawkner y Armstrong, 2004a;c, Rossiter et al, 2002). Se sugiere que éste es el modelo que se elige, hasta que se identifique un modelo con una base fisiológica sensata con la que se pueda parametrizar el componente lento (Fawkner y Armstrong, 2004b).

En el ejercicio de alta intensidad, el componente lento del VO<sub>2</sub> no tiene tiempo para aparecer (aunque los investigadores deben asegurarse que esa intensidad de ejercicio es lo suficientemente intensa, como en este caso), por lo tanto, no se distorsiona (Whipp y Özyener, 1998) la monoexponencialidad de la respuesta, y puede ser mostrada como tal (modelo 2, ver anexo). Sin embargo, sólo unas pocas investigaciones anteriores intentaron investigar la respuesta cinética al ejercicio de alta intensidad con niños, y adoptaron los métodos más sencillos (ver Tabla 2) para caracterizar la respuesta. Esto posiblemente se debe a la pobre resolución temporal de la información recolectada, la cual podría haber evitado una parametrización más compleja del modelo (ver más abajo).



**Figura 1.** Respuesta del  $VO_2$  al ejercicio de alta intensidad en un niño de 11 años (varón) en cuatro ocasiones separadas, ilustrando los datos interpolados del sistema respiración por respiración y la línea que mejor se adecuó utilizando un modelo doble exponencial luego de la fase 1 (modelo 3). El último gráfico ilustra los datos promediados y la línea que mejor se adecuó. Los parámetros de la respuesta para cada etapa están en la tabla 3.

- d. Estudios anteriores que investigaron la respuesta de la cinética del  $VO_2$  al ejercicio, confiaron en los tradicionales sistemas cámaras de mezclado, donde las muestras de los gases expirados se extraen de las cámaras de mezclado generalmente a intervalos de medición de 15 a 30 segundos (Tablas 1 y 2). Sin embargo, para capturar con precisión la respuesta dinámica del  $VO_2$  al comienzo del ejercicio, se deben recolectar datos en relación a los gases y a la respiración con una mayor resolución temporal, por ejemplo con el sistema de respiración por respiración. Desde el trabajo pionero de Beaver et al. (1973), los instrumentos computarizados para medir en el momento el consumo de energía y la función cardiovascular y respiratoria han evolucionado mucho y aunque la combinación de la espectrometría de masas y la turbina de flujo es posiblemente la herramienta más moderna para determinar la respuesta exacta del sistema “respiración por respiración” en la boca; la mayoría de estos instrumentos que se pueden comprar, disponen de una rápida respuesta del  $O_2$  y del dióxido de carbono y pueden generar datos “respiración por respiración”. A pesar de esto, como queda claro en las tablas 1 y 2, son pocos los estudios que han utilizado estas técnicas en niños.
- d. Una de las desventajas de evaluar las variables ventilatorias y gaseosas a través de un sistema respiración por respiración, es que los resultados no sólo reflejan las señales fisiológicas que realmente nos interesan, sino también las fluctuaciones respiración por respiración en los patrones respiratorios. Desafortunadamente, para los pediatras fisiólogos del ejercicio, la magnitud de estas fluctuaciones (el ruido) parece ser mayor durante el ejercicio en niños

que en los adultos (Potter et al, 1999). Dado que la señal (en este caso amplitud del  $\dot{V}O_2$ ) también es menor para los niños, la relación señal-ruido resultante, es por lo general tan débil que los modelos matemáticos adaptados a los niños, deben tener consideraciones importantes, si el investigador quiere tener total confianza de que la adecuación del modelo refleja correctamente la señal fisiológica. Esto ocurre de esta manera, sobretodo cuando los modelos involucran parámetros independientes (por ejemplo modelos 3 y 5, ver Tabla 3, Figura 1 y anexo). También esto se convierte en un tema importante, cuando se trabaja con poblaciones con alguna patología, cuya tolerancia al ejercicio puede ser restringida, así el estímulo debe ser bajo y por lo tanto la respuesta de la señal es muy pequeña.

Existen dos procedimientos principales que el investigador puede realizar para incrementar la confianza en los parámetros de respuesta; reducir la relación señal-ruido y reportar intervalos de confianza del 95% en la respuesta.

El último de estos procedimientos es relativamente simple de lograr, al igual que muchos de los procedimientos de adecuación reiterativos devuelven un intervalo de confianza del 95% para los parámetros de respuesta. Idealmente se debe alcanzar un intervalo de confianza de no más de  $\pm 5$  segundos para el  $\tau$  primario y un  $\pm 5\%$  para la amplitud primaria. La reducción de la relación entre la señal y el ruido para alcanzar esto, sin embargo, puede generar una demanda práctica sobre el diseño del estudio. Se puede disminuir el "ruido" de la respuesta a través de la realización de transiciones repetidas, alineación del tiempo y promediando las respuestas; mientras que teóricamente, la señal se mantiene inalterada (ver Lamara et al, 1987, para obtener una explicación más profunda sobre este tema). Por lo tanto, mientras que una sola transición no permite un nivel de confianza adecuado, en la estimación de los parámetros de la respuesta, sí se lograría esa confianza al promediar una serie de datos (ver tabla 3 y figura 1 para tener un ejemplo). El número de transiciones que se requieren para lograr un nivel de confianza aceptable, es directamente proporcional a la cantidad de datos que están siendo adaptados, a la variabilidad de la información y la magnitud de la señal, y por lo tanto va a variar de un sujeto a otro. En niños, en donde los datos son inherentemente ruidosos, quizás se necesiten 10 transiciones (pasadas) de moderada intensidad. A mayores intensidades, se requieren menores transiciones ya que la señal es mayor.

Con fines prácticos, si el investigador está interesado en hallar la respuesta a un protocolo efectuado a moderada intensidad, deberá estimar el número de transiciones repetidas que se necesitan para alcanzar un 95% del intervalo de confianza utilizando la siguiente ecuación (Lamarra et al, 1987). Para esto, sólo se necesitan la amplitud, la desviación estándar y el estado estable del  $\dot{V}O_2$  luego de una sola transición (ecuación 1).

#### Ecuación 1

$$n = \left[ \frac{\hat{L} \cdot \dot{V}O_2 (sd)}{K_n \cdot \Delta \dot{V}O_2 (ss)} \right]^2$$

Donde n es el número de transiciones necesarias, L es una constante que depende de la constante de tiempo subyacente, y de la cantidad de datos disponibles para adecuarla;  $\dot{V}O_2 (sd)$  es la desviación estándar de las fluctuaciones respiración por respiración en el  $\dot{V}O_2$ ;  $\Delta \dot{V}O_2 (ss)$  es la amplitud del estado estable del  $\dot{V}O_2$  por encima del nivel de inicio y  $K_n$  es el intervalo de confianza.

Se ha comprobado que esta técnica es útil cuando se investiga la respuesta de la cinética del  $\dot{V}O_2$  en niños (Fawkner et al, 2002), pero puede ser especialmente efectiva cuando se trata de niños con desórdenes metabólicos o cardiorrespiratorios. En estos casos, repetir los períodos de ejercicio puede ser muy demandante y difícil de alcanzar, aunque además puede que no tenga sentido, si las respuestas tienen mucho ruido luego de promediarlas (Pottery Unnithan, 2005). Por ejemplo, un estudio reciente que investigaba la cinética del  $\dot{V}O_2$  en pacientes con fibrosis cística (promedio de edad  $15.8 \pm 6.1$  años) aunque se promedió luego de 4 transiciones, se tuvo que excluir 6 de los 24 pacientes debido a la magnitud del ruido (Hebestreit et al, 2005). Desafortunadamente, hasta la fecha, pocos investigadores han incorporado cualquiera de estos procedimientos, y donde pueden haber promediado una cierta cantidad de transiciones para reducir la relación señal - ruido, esto tiene relativamente poco sentido a menos que también se proporcionen los intervalos de confianza (Tabla 1 y 2).

## CONCLUSION

Con la tecnología disponible en la actualidad y la comprensión de la respuesta al ejercicio, es posible investigar la cinética



del  $\text{VO}_2$  en niños de manera confiable. Esto sólo es posible, si el investigador es capaz de tomar las etapas adecuadas (del protocolo) para asegurarse que los datos se muestren correctamente y que las variables de la respuesta se trabajen con los intervalos de confianza reportados. Hasta la fecha, las investigaciones que han logrado esto son muy pocas y todavía queda mucho por aprender en torno a la respuesta de la cinética del  $\text{VO}_2$  tanto en niños sanos como en niños con alguna enfermedad.

### Puntos Clave

La respuesta de la cinética del  $\text{VO}_2$  al ejercicio representa la eficiencia combinada de los sistemas cardiovascular, pulmonar y metabólico, y una determinación precisa del potencial de la respuesta, provee mucha información útil a través de una metodología no invasiva.

Sin embargo, la determinación precisa de la respuesta de la cinética del  $\text{VO}_2$  es difícil en niños, especialmente aquellos con poca tolerancia al ejercicio, debido principalmente el “ruido” del sistema respiración por respiración, enmascara la verdadera respuesta fisiológica subyacente, y las pequeñas amplitudes de la señal de respuesta.

A pesar de esto, es posible determinar y cuantificar la respuesta de la cinética del  $\text{VO}_2$  con niños si se utilizan las etapas apropiadas para aplicar de manera cuidadosa la metodología seleccionada y reportar la respuesta de las variables con intervalos de confianza. De esta manera, tanto el investigador como el lector, pueden tener confianza de que los datos reportados sean significativos.

## APENDICE

---

$$\Delta\text{VO}_2(t) = \Delta\text{VO}_2(\text{ss}) \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \text{ [Modelo 1, MRT]}$$

$$\Delta\text{VO}_2(t) = \Delta\text{VO}_2(\text{ss}) (1 - e^{-(t-\delta_1)/\tau}) \text{ [Modelo 2]}$$

$$\Delta\text{VO}_2(t) = A_1 \cdot (1 - e^{-(t-\delta_1)/\tau_1}) + A_2 \cdot (1 - e^{-(t-\delta_2)/\tau_2}) \text{ [Modelo 3]}$$

$$\Delta\text{VO}_2(t) = A_1 \cdot (1 - e^{-(t-\delta_1)/\tau_1}) S(t - \delta_2) \text{ [Modelo 4]}$$

$$\Delta\text{VO}_2(t) = A_1 \cdot (1 - e^{-(t-\delta_1)/\tau_1}) + A_2 \cdot (1 - e^{-(t-\delta_2)/\tau_2}) + A_3 \cdot (1 - e^{-(t-\delta_3)/\tau_3}) \text{ [Modelo 5]}$$

Donde: MRT es el tiempo medio de respuesta,  $t$  tiempo en segundos;  $\Delta\text{VO}_2(t)$ , incremento en el  $\text{VO}_2$  en el tiempo por encima del nivel de control previo;  $\Delta\text{VO}_2(\text{ss})$ , incremento del  $\text{VO}_2$  en el estado estable;  $\tau$ , constante de tiempo la cual es el tiempo para alcanzar el 63% del  $\Delta\text{VO}_2(\text{ss})$ ;  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  y  $\tau_3$  y  $\delta_1$ ,  $\delta_2$   $\delta_3$ , amplitudes, constantes de tiempo y retraso para cada exponencial respectivamente.

## REFERENCIAS

---

1. Armon, Y., Cooper, D.M., Flores, R., Zanconato, S. and Barstow, T.J (1991). Oxygen uptake dynamics during high-intensity exercise in children and adults. *Journal of Applied Physiology* 70, 841- 848
2. Barstow, T.J., Jones, A.M., Nguyen, P.H. and Casaburi, R (1996). Influence of muscle fiber type and pedal frequency on oxygen uptake kinetics of heavy exercise. *Journal of Applied Physiology* 81, 1642-1650
3. Beaver, W.L., Wasserman, K. and Whipp, B.J (1973). On-line computer analysis and breath-by-breath graphical display of exercise function tests. *Journal of Applied Physiology* 34, 123-132
4. Burnley, M., Jones, A.M., Carter, H. and Doust, J.H (2000). Effects of prior heavy exercise on phase 2 pulmonary oxygen uptake kinetics during heavy exercise. *Journal of Applied Physiology* 89, 1387-1396
5. Cooper, D.M., Weiler-Ravell, D., Whipp, B.J. and Wasserman, K (1984). Aerobic parameters of exercise as a function of body size during growth in children. *Journal of Applied Physiology* 56, 628-634
6. Cooper, D.M., Berry, C., Lamarra, N. and Wasserman, K (1985). Kinetics of oxygen uptake and heart rate at onset of exercise in children. *Journal of Applied Physiology* 59, 211-217
7. Fawcner, S.G. and Armstrong, N (2000). Assessment of critical power in children. *Pediatric Exercise Science* 14, 259-268
8. Fawcner, S.G. and Armstrong, N (2002). Modelling the  $\text{VO}_2$  kinetic response to moderate intensity exercise in children. *Acta Kinesiologiae Universitatis Tartuensis* 7, 80-84

9. Fawcner, S.G., Armstrong, N., Potter, C.R. and Welsman, J.R (2002). VO<sub>2</sub> kinetics in children and adults following the onset of moderate intensity exercise. *Journal of Sports Sciences* 20, 319- 326
10. Fawcner, S.G. and Armstrong, N (2003). Oxygen uptake kinetic response to exercise in children. *Sports Medicine* 33, 651-669
11. Fawcner, S.G. and Armstrong, N (2004). Sex differences in the oxygen uptake kinetic response to heavy-intensity exercise in prepubertal children. *European Journal of Applied Physiology* 93, 210- 216
12. Fawcner, S.G. and Armstrong, N (2004). Modelling the VO<sub>2</sub> kinetic response to heavy intensity exercise in children. *Ergonomics* 47, 1517-1527
13. Fawcner, S.G. and Armstrong, N (2004). Longitudinal changes in the kinetic response to heavy-intensity exercise in children. *Journal of Applied Physiology* 97, 460-466
14. Freedson, P.S., Gilliam, T.B., Sady, S.P. and Katch, V.L (1981). Transient VO<sub>2</sub> characteristics in children at the onset of steady-rate exercise. *Research Quarterly for Exercise and Sport* 52, 167- 173
15. Gaesser, G.A. and Poole, D.C (1996). The slow component of oxygen uptake kinetics in humans. *Exercise and Sports Sciences Reviews* 24, 35-71
16. Grassi, B., Hogan, M.C., Kelley, K.M., Aschenbach, W.G., Hamann, J.J., Evans, R.K., Patillo, R.E. and Gladden, L.B (2000). Role of convective O<sub>2</sub> delivery in determining VO<sub>2</sub> on-kinetics in canine muscle contracting at peak VO<sub>2</sub>. *Journal of Applied Physiology* 89, 1293-1301
17. Hebestreit, H., Kreimler, S., Hughson, R.L. and Bar-Or, O (1998). Kinetics of oxygen uptake at the onset of exercise in boys and men. *Journal of Applied Physiology* 85,1833-1841
18. Hebestreit, H., Hebestreit, A., Trusen, A. and Hughson, R.L (2005). Oxygen uptake kinetics are slowed in cystic fibrosis. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 37, 10-17
19. Hill, D.K. and Lupton, H (1923). Muscular exercise, lactic acid and the supply and utilisation of oxygen. *Quarterly Journal of Medicine* 16, 135-171
20. Jones, A.M. and Poole, D.C (2005). Oxygen uptake kinetics in sport, exercise and medicine. *Routledge, London and New York*
21. Lamarra, N., Whipp, B.J., Ward, S.A. and Wasserman, K (1987). Effect of interbreath fluctuations on characterizing exercise gas exchange kinetics. *Journal of Applied Physiology* 62, 2003-2012
22. Moritani, T (1981). Critical power as a measure of physical work capacity and anaerobic threshold. *Ergonomics* 24, 339-350
23. Obert, P., Cleuziou, C., Candau, R., Courteix, D., Lecoq, A. and Guenon, P (2000). The slow component of O<sub>2</sub> uptake kinetics during high-intensity exercise in trained and untrained prepubertal children. *International Journal of Sports Medicine* 21, 31-36
24. Poole, D.C., Ward, S.A., Gardner, G.W. and Whipp, B.J (1988). Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. *Ergonomics* 31, 1265-1279
25. Poole, D.C., Schaffartzik, W., Knight, D.R., Derion, T., Kennedy, B., Guy, H.J., Prediletto, R. and Wagner, P.D (1991). Contribution of exercising legs to the slow component of oxygen uptake kinetics in humans. *Journal of Applied Physiology* 71, 1245-1253
26. Poole, D.C., Barstow, T.J., Gaesser, G.A., Willis, W.T. and Whipp, B.J (1994). VO<sub>2</sub> slow component: Physiological and functional significance. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 26, 1354-1358
27. Potter, C.R., Childs, D.J., Houghton, W. and Armstrong, N (1999). Breath-to-breath noise in childrens ventilatory and gas exchange responses to exercise. *European Journal of Applied Physiology* 80, 118-124
28. Potter, C.R. and Unnithan, V.B (2005). Interpretation and implementation of oxygen uptake kinetics studies in children with spastic cerebral palsy. *Developmental Medecine and Child Neurology* 47, 353-357
29. Robinson, S (1938). Experimental studies of physical fitness in relation to age. *Internationale Zeitschrift fur angewandte Physiologie, einschliesslich Arbeitsphysiologie* 10, 251-323
30. Rossiter, H.B., Ward, S.A., Kowalchuk, J.M., Howes, F.A., Griffiths, J.R. and Whipp, B.J (2002). Dynamic asymmetry of phosphocreatine concentration and O<sub>2</sub> uptake between the on-and-offtransients of moderate-and high-intensity exercise in humans. *Journal of Physiology* 541, 991-1002
31. Sady, S.P (1981). Transient oxygen uptake and heart rate responses at the onset of relative endurance exercise in prepubertal boys and adult men. *International Journal of Sports Medicine* 2, 240-244
32. Sady, S.P., Katch, V.I., Villanacci, J.F. and Gilliam, T.B (1983). Children-adult comparisons of VO<sub>2</sub> and HR kinetics during submaximal exercise. *Research Quarterly for Exercise and Sport* 54, 55-59
33. Springer, C., Barstow, T.J., Wasserman, K. and Cooper, D.M (1991). Oxygen uptake and heart rate responses during hypoxic exercise in children and adults. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 23, 71-79
34. Tschakovsky, M.E. and Hughson, R.L (1999). Interaction of factors determining oxygen uptake at the onset of exercise. *Journal of Applied Physiology* 86, 1101-1113
35. Wasserman, K., Hansen, J.E., Sue, D.Y., Whipp, B.J. and Casaburi, R (1994). Principles of exercise testing and interpretation, 2nd edition. *Lea and Febiger, Philadelphia*
36. Whipp, B.J. and Mahler, M (1980). Dynamics of pulmonary gas exchange during exercise. In: Pulmonary gas exchange. Ed: B.J. West. 2nd Edition. *Academic Press, New York*. 33-96
37. Williams, C.A., Carter, H., Jones, A.M. and Doust, J.H (2001). Oxygen uptake kinetics during treadmill running in boys and men. *Journal of Applied Physiology* 90, 1700-1706
38. Womack, C.J., Davis, S.E., Blumer, J.L., Barrett, E., Weltman, A.L. and Gaesser, G.A (1995). Slow component of O<sub>2</sub> uptake during heavy exercise: Adaptation to endurance training. *Journal of Applied Physiology* 79, 838-845
39. Zanonato, S., Cooper, D.M. and Armon, Y (1991). Oxygen cost and oxygen uptake dynamics and recovery with 1 min of exercise in children and adults. *Journal of Applied Physiology* 71, 993-998

## Cita Original

Samantha G. Fawcner and Neil Armstrong. Can We Confidently Study  $VO_{2\max}$  Kinetics in Young People? Journal of Sports Science and Medicine (2007) 6, 277 - 285.